

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان
Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

En vue de l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Génie Mécanique

Spécialité : Assemblages Soudés & Matériaux

Présenté par : **Khouani Besma**

Thème

**OPTIMISATION DES PARAMETRES DE SOUDAGE
PAR POINTS**

Le : 23/09/2020 devant le jury composé de :

Président :	SEBBA Fethi	MCA	UABB Tlemcen
Encadreur :	BENACHOUR Mustapha	Pr.	UABB Tlemcen
Co-Encadreur :	RAHOU Mohammed	Pr.	UABB Tlemcen
Examineur :	ACHOUI Mohammed	MAA	UABB Tlemcen

Année universitaire : 2019-2020

Dédicace



A la mémoire de mon cher papa,

Que dieu le tout puissant vous accueille dans son éternel paradis et vous accorde sa clémence et sa miséricorde.

A la plus belle perle du monde...ma tendre mère,

En témoignage de votre affection, votre sacrifices et votre précieux conseils qui mon conduit à la réussite dans tous ce que je fais, je t'aime maman...

A ma plus chère tante RAHMA,

Vous êtes ma deuxième maman, je t'aime plus fort...

A mes chers frères IHEB et RADOUANE,

Qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.

A ma aimable sœur ABIA,

Que dieu tout puissant, vous donne santé et bonheur. Je t'aime très fort...

A mes très chères et merveilleuse amies

Que je l'aime profondément,

qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité, je vous souhaite une vie pleine de bonheur, de prospérité et beaucoup de succès.

A tous mes proches

A tous ceux qui mon aidé afin de réaliser ce travail, et à tous ceux que j'aime et qui m'aiment.

Remerciement

***JE REMERCIE TOUT D'ABORD, ALLAH,** le tout puissant de m'avoir donné le privilège et la chance d'étudier et de suivre le chemin de la science et de la connaissance. Et de m'avoir donné la force dans les moments difficiles d'éditer ce mémoire.*

*Mon maitre et encadreur de mémoire : **DR. M. BENACHOUR,***

Je vous remercie pour la gentillesse et la spontanéité avec lesquelles vous avez bien voulu diriger ce travail

J'ai eu le plaisir de travailler sous votre direction, et j'ai trouvé auprès de vous le conseiller et le guide qui ma reçu en toute circonstance avec sympathie, sourire et bienveillance.

Veillez, cher Maitre, trouvé dans ce modeste travail l'expression de ma haute considération, de ma sincère reconnaissance et de mes profonds respects.

Je remercie profondément les membres de jures MS SEBAA Fethi, Pr. ACHOUI Mohammed, et MS RAHOU Mohammed

Je tiens à vous exprimer toute ma reconnaissance pour l'honneur que vous m'avez fait en acceptant de juger mon travail. Dans ce travail l'expression de mes vifs remerciements et de mon estime

A toute personne qui de près ou de loin a contribué à la réalisation de ce travail.

RESUME

RESUME

Le soudage par points est un procédé d'assemblage discontinu, est une méthode de soudage utilisant le principe de la soudure par résistance à électrode non fusible où l'élévation de température pour obtenir le point de fusion du métal s'ajoute à une forte pression mécanique. Il s'applique à des assemblages en tôles d'aciers doux, allié, inoxydable, d'aluminium, etc. d'épaisseurs généralement comprises entre 0,5 et 10 mm.

Deux électrodes de cuivre compriment les pièces de métal à souder l'une contre l'autre puis les font traverser par un courant de très forte intensité. La chaleur engendrée par ce courant à l'interface tôle-tôle fait fondre localement le métal, ce qui crée, après solidification, un point de soudure.

Une soudure est réalisée en une à deux secondes, avec un temps effectif de passage du courant de quelques dixièmes de secondes. Les phénomènes physiques entrant en jeu lors d'une soudure sont à la fois d'origine électrique, thermique, mécanique et métallurgique.

Le thème abordé, intègre dans ce sens et est intitulé : « optimisation des paramètres de soudage par points ».

Parmi les différents paramètres de soudage, l'intensité du courant qui joue un rôle prépondérant, car elle conditionne directement la taille de la soudure. Le domaine de soudabilité d'un produit est défini comme la plage d'intensité permettant d'obtenir une soudure de qualité satisfaisante, tous les autres paramètres (effort mécanique, durées, etc.) étant fixés préalablement. L'effet des paramètres de soudage est étudié à savoir l'intensité du courant de soudage, l'effort et le temps du soudage. L'expérimental les résultats ont confirmé la validité de la méthode de Taguchi pour améliorer les performances de soudage et optimiser les paramètres de soudage dans les opérations de soudage par points par résistance.

ABSTRACT

Spot welding is a discontinuous assembly process, is a welding method using the principle of resistance welding with non-fusible electrode where the rise in temperature to obtain the melting point of the metal is added to a high-pressure mechanical. It is applicable to assemblies of sheets of mild, alloy, stainless steel, aluminium, etc. Thickness generally between 0.5 and 10mm.

Two copper electrodes compress the pieces of metal to be welded against each other and then pass them through a very high current. The heat generated by this current at the sheet-sheet interface locally melts the metal, which creates, after solidification, a weld point.

A weld is performed in one to two seconds, with an effective current flow time of a few tenths of a second. The physical phenomena that come into play during a weld are of electrical, thermal, mechanical and metallurgical origin.

The theme addressed, integrates in this sense and is entitled: "optimization of spot-welding parameters".

Among the various welding parameters, the intensity of the current which play a preponderant role, because it directly conditions the size of the weld. The weldability range of a product is defined as the range of intensity making it possible to obtain a weld of satisfactory quality, all the other parameters (mechanical force, times, etc.) being fixed beforehand. The effect of the welding parameters is studied, namely the intensity of the welding current, the force and the welding time. The experimental results confirmed the validity of Taguchi's method for improving welding performance and optimizing welding parameters in resistance spot welding operations.

المخلص

الحام النقطي هو عملية تجميع متقطعة وهي طريقة لحام تستخدم مبدأ اللحام بالمقاومة مع قطب كهربائي غير قابل للانصهار حيث يضاف ارتفاع درجة الحرارة للحصول على نقطة انصهار المعدن الى ضغط مرتفع ميكانيكي. انها قابلة للتطبيق على تجميعات الصفائح الخفيفة الفولاذ المقاوم للصدأ السبائك الالمنيوم الخ. يتراوح سمكها بشكل عام بين 0.5 و10 ملم

يقوم قطبان نحاسيان بضغط قطب المعدن ليتم لحامها ببعضها البعض تم تمريرها من خلال تيار عالي جدا. الحرارة المتولدة من هذا التيار قي واجهة الصفيحة الصفيحة تذوب المعدن محليا مما يخلق بعد التصلب نقطة لحام. يتم اجراء اللحام في غضون ثانية الى ثانيتين مع وقت تدفق تيار فعال يبلغ بضعة اعشار من الثانية. ان الظواهر الفيزيائية التي يدخل حيز التنفيذ اثناء اللحام هي من الأصل كهربائي وحراري و ميكانيكي و معدني. الموضوع الذي تم تناوله يتكامل بهذا المعنى وهو بعنوان "تحسين معلمات اللحام البقعي". من بين معلمات اللحام المختلفة تلعب شدة التيار دورا مرجحا لأنها تحدد حجم اللحام بشكل مباشر. يتم تعريف نطاق قابلية اللحام للمنتج على انه نطاق الشدة الذي يجعل من الممكن الحصول على لحام بجودة مرضية ويتم اصلاح جميع المعلمات الأخرى (القوة الميكانيكية الأوقات الخ) مسبقا. يتم دراسة تأثير معاملات اللحام أي شدة تيار اللحام والقوة ووقت اللحام. كدت النتائج صحة طريقة Taguchi لتحسين أداء اللحام وتحسين معايير اللحام في عمليات لحام البقعة المقاومة.

Liste des figures

Chapitre I: Etude bibliographique

<i>Figure I.1</i> : Soudage par points	4
<i>Figure I.2</i> : Principe du soudage par points.	5
<i>Figure I.3</i> : Mécanisme de formation de point de soudure de soudage par point	6
<i>Figure I.4</i> : Illustration des phénomènes électriques dans le procédé de soudage par points ; (a) Evolution des résistances en cours de soudage d'un assemblage de tôles nues, (b) Circuit électrique équivalent d'un assemblage de deux tôle nues	7
<i>Figure I.5</i> : Temps de maintien exprimés en milliseconde et en période	8
<i>Figure I.6</i> : Les différentes phases d'un cycle de soudage	9
<i>Figure I.7</i> : Exemple des différents formats d'électrode	11
<i>Figure I.8</i> : Coupe d'un point soudée	11
<i>Figure I.9</i> : Microstructures générées par l'opération de soudage	13
<i>Figure I.10</i> : Distance entre chaque point.....	14
<i>Figure I.11</i> : Effets du courant de soudage sur le diamètre du noyau soudé	15
<i>Figure I.12</i> : Effets du temps de soudage sur le diamètre du noyau	15
<i>Figure I.13</i> : Effets de l'effort aux électrodes sur le diamètre du noyau soudé	16
Chapitre II: Méthode d'optimisation de Taguchi	
<i>Figure II.1</i> : effet (a) de courant de soudage et (b) souder le temps sur le diamètre de noyau	23
<i>Figure II.2</i> : effet (a) de courant de soudage et (b) souder le temps sur pénétration de la soudure.....	24
<i>Figure II.3</i> : effet de courant de soudage sur (a) la largeur (b) l'épaisseur de la ZAT.....	25
<i>Figure II.4</i> : effet de (a) le courant de soudage et (b) souder le temps sur l'énergie des défauts.....	25
<i>Figure II.5</i> : effet de diamètre de noyau sur la résistance à la traction de soudage par point.....	26
<i>Figure II.6</i> : La variation du diamètre de noyau (a) et de la largeur de ZAT (b) avec le temps de soudure.....	27
<i>Figure II.7</i> : Résistance au cisaillement et à la traction en fonction du temps de soudage avec une variation du courant de soudage de 7, 8 et 9 kA à une force d'électrode de 3,5 Kn.....	27

Figure II.8: Le niveau bas du facteur est noté par - 1 et le niveau haut par +1. Le domaine de variation du facteur est constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut.....	30
Figure II.9: Chaque facteur est représenté par un axe gradué et orienté	30
Figure II.10: Dans l'espace expérimental, les niveaux des facteurs définissent des points expérimentaux.....	31
Figure II.11: Les points expérimentaux sont disposés dans le domaine d'étude défini par l'expérimentateur.....	32
Chapitre III: Etat de l'art sur les effets de paramètres de soudage par point	

Figure III.1: Effet du temps de maintien en fonction de l'épaisseur	34
Figure III.2 : Effet de l'épaisseur de la tôle	34
Figure III.3: Evolution de la limite élastique pour différentes épaisseurs soudées.....	34
Figure III.4: Effet du temps de soudage sur la résistance à la traction	35
Figure III.5 : Effet du courant de soudage sur la résistance à la traction	35
Figure III.6: Configuration de l'assemblage en acier doux soudé par point	36
Figure III.7: Effets des paramètres de soudage sur le rapport S/N (épaisseur = 0.8mm).....	40
Figure III.8: Effets des paramètres de soudage sur le rapport S/N (épaisseur = 0.8mm).....	40
Figure III.9 Effets du courant de soudage sur la résistance du joint de soudure	41
Figure III.10: Taille du noyau du point de soudure en fonction du courant de soudage	41
Figure III.11: Effet du courant de soudage sur l'évolution : (a) du diamètre du noyau du point de soudure (b) de la résistance au cisaillement maximale par traction	42
Figure III.12: . Effet du temps de soudage sur l'évolution : (a) du diamètre du noyau du point de soudure (b) de la résistance au cisaillement maximale par traction	42
Figure III.13: Evolution du rapport S/N relatif à la résistance à la traction en fonction des paramètres de soudage.....	43

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Effets du temps d'accostage.....	7
Tableau I.2 : Effets de l'effort	8
Tableau I.3 : Effet de l'intensité.....	8
Tableau I.4 : Effets du temps maintien.....	9
Tableau III.1 : Dimension des échantillons	36
Tableau III.2 : Paramètres de soudage et les niveaux appliquées	37
Tableau III.3 : Matrice expérimentale orthogonale L8	37
Tableau III.4 : Résultats expérimentaux de la résistance au cisaillement par traction	38
Tableau III.5 : Rapport S/N pour les différents	39
Tableau III.6 Réponse du rapport S/N pour la résistance au cisaillement par traction.....	40
Tableau III.7 : Effet du courant de soudage sur le diamètre du noyau et la profondeur de pénétration de l'électrode.....	41
Tableau III.8 Effet du courant de soudage sur la dureté dans la zone de fusion et le mode de rupture.....	42
Tableau III.9 Paramètres expérimentale de soudage à trois niveaux.....	43
Tableau III.10 Combinaison des paramètres de soudage et les résultats expérimentaux.....	44

LISTE DES NOTATIONS

W : Effet de joule (joule)

R : Résistance (Ω)

I : Intensité (ampère)

t: Temps de soudage –cycle- (seconde)

Q : est la quantité de chaleur générée en joules

y : est la réponse ou la grandeur d'intérêt. Elle est mesurée au cours de l'expérimentation et elle est obtenue avec une précision donnée.

x_i : représente le niveau attribué au facteur i par l'expérimentateur pour réaliser un essai

a_0, a_i, a_{ij}, a_{ii} : sont les coefficients du modèle mathématique adopté a priori

Y : est le vecteur des réponses.

X : est la matrice de calcul, ou matrice du modèle, qui dépend des points expérimentaux choisis pour exécuter le plan et du modèle postulé.

a : est le vecteur des coefficients.

e est le vecteur des écarts

L_j : Fonction de perte globale

n : Nombres de tests

y_i : Valeur expérimentale de la i ème caractéristique de qualité

h_j : Rapport S/N

SOMMAIRE

Chapitre1 : Etude bibliographique

I. Définition de soudage par résistance	3
II. Soudage par point.....	3
III.Parametres de soudage	4
IV. Principe de base du procède	4
V. Rappel de base d'électricité	5
V. 1. Mécanisme de formation de la soudure	6
V.2. Déroulement du cycle de soudage	6
VI. Electrode	10
VII. Caractéristique d'un point soudée	11
VII. 1 Géométrie d'un point soudé	11
VII.2. Microstructure du point soudé	12
VII.3. Distance entre chaque point.....	14
VII.4. Distance minimale entre le point de soudure et le bord de la pièce.....	14
VII.5. Soudabilité	14

Chapitre 2 : Méthode d'optimisation de Taguchi

I. INTRODUCTION.....	19
II. Analyse de variance.....	20
III. Application de la méthode Tguchi.....	22
IV. Analyse de variance de la méthode de Taguchi.....	22
a. Paramètre de soudage par résistance.....	22
b. Effet du temps de maintien et le courant de soudage sur la taille du noyau et sur la pénétration.....	23
c. Effet du courant de soudage et du temps de soudage sur le ZAT.....	24
d. Influence du courant de soudage sur la charge à la rupture.....	25
e. Influence de diamètre de noyau sur la résistance à la traction.....	26
f. L'effet du temps de soudure sur le diamètre du noyau et la ZAT et sur la charge de cisaillement en traction.....	26
V. Avantage de la méthode de Taguchi.....	28
VI. Modélisation mathématique.....	28

VI.1. Les plans d'expérience.....	28
VI.1.1. Conditions d'application.....	29
VI.2. Notion d'espace expérimental.....	29
VI.3. Notion de modélisation mathématique.....	32
VI.4. Système d'équations.....	33
VII. Les tables de Taguchi.....	33
VII.1 Les plans de Plackett et Burmann.....	33
VIII. Analyse de la variance.....	34
a . Analyse de la variance du modèle.....	34
b . Analyse de la variance résiduelle.....	34
Chapitre3 : Etat de l'art sur les effets de paramètres de soudage par	
point	
I. INTRODUCTION.....	33
II. OPTIMISATION ET ANALYSE DES EFFETS DES PARAMETRES DE SOUDAGE PAR POINTS	33
III. Synthèse globale	45

INTRODUCTION
GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les assemblages soudés dans l'industrie sont effectués manuellement ou par robot en grande majorité par procédés de soudage à l'arc TIG, MIG/MAG et par point.

Le soudage de toutes sortes a joué un rôle important dans le développement de l'industrie, en particulier l'assemblage et la maintenance, le soudage par point occupe la plus grande part dans ce domaine, en particulier l'industrie automobile, mécano soudé et assemblage métallique. La qualité de la structure soudée est souvent évaluée par la résistance et la ductilité des structures soudées en raison de leur rôle important dans la rigidité et la résistance aux chocs de la structure. En conséquence, il est nécessaire d'évaluer le comportement à la rupture dans les assemblages soudés par résistance en comprenant le comportement mécanique et le comportement à la rupture de matériaux individuels.

Le soudage par résistance par points est un procédé d'assemblage très couramment utilisé dans différentes industries. Il présente l'avantage d'être à la fois rapide, économique et adapté au soudage des aciers.

La soudabilité par points des aciers austénitiques a été largement étudiée depuis plusieurs décennies, le comportement mécanique des points soudés des aciers doux présente à ce jour un champ d'investigation. Néanmoins, la tenue mécanique de l'assemblage final dépend non seulement des propriétés mécaniques intrinsèques des tôles, mais aussi de celles des liaisons soudées, par lesquelles transitent les efforts. Il est donc nécessaire de disposer d'outils permettant de prévoir la tenue mécanique des points soudés par résistance.

Les facteurs qui influencent la formation et la croissance du noyau de soudure pour le soudage par points d'une tôle métallique ont été suffisamment discutés. Bien que la force, le courant de soudage, le temps de soudage et l'électrode sont des paramètres d'entrée de base pour la génération de chaleur, les résistances de contact statiques et dynamiques influence de fusion et la taille du noyau.

La résistance de contact électrique statique (ECR) dépend en grande partie des caractéristiques des deux surfaces de contact avant l'écoulement du courant de soudage, la résistance du contact dynamique (DCR) représente l'effet combiné de la résistance interfaciale et la résistance des matériaux pendant le soudage.

Face à la complexité des ruptures pouvant être rencontrées, le premier objectif du mémoire est de déterminer les paramètres de soudage optimaux afin de maximiser la résistance à la rupture. Le deuxième objectif est d'identifier les paramètres qui influent sur le comportement mécanique.

INTRODUCTION GENERALE

Le chapitre I introduit les notions générales relatives au procédé de soudage par point où sont décrits les différents mécanismes de formation de la soudure.

Le chapitre II décrit l'utilisation de la méthode de Taguchi dont le but d'évaluer les caractéristiques mécaniques afin de comprendre les mécanismes de rupture des points soudés et l'effet des différents paramètres sur le comportement mécanique d'un joint soudé.

Le dernier chapitre est consacré à la présentation de l'état de l'art sur les effets de paramètres de soudage. Une discussion sur les effets des paramètres de soudage par points étudiés est menée afin de comprendre globalement la tenue mécanique des assemblages soudés par points et l'effet de la géométrie pour l'acier doux. Le mémoire est finalisé par une conclusion générale et des perspectives.

CHAPITRE I

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I. DEFINITION DU SOUDAGE PAR RESISTANCE

Le soudage par résistance est un procédé sans métal d'apport qui utilise les effets conjugués d'une pression mécanique et d'un courant électrique traversant les pièces. Les pièces à souder sont superposées et sont serrées localement entre deux électrodes en alliage de cuivre. L'ensemble, pièces électrodes, est traversé par un courant de soudage, sous une faible tension, qui provoque une forte élévation de la température par effet de joule. Dans le cas de surfaces planes, un noyau de matière en fusion est créé à la jointure des pièces.[1]

II. SOUDAGE PAR POINTS

Le soudage par points est un procédé d'assemblage discontinu (Figure I.1), par recouvrement. Il s'applique à des assemblages en tôles d'aciers doux, allié, inoxydable, d'aluminium, etc. d'épaisseurs généralement comprises entre 0,5 et 10 mm. Lors de l'opération de soudage les deux pièces sont placées et maintenues dans leur position respective d'assemblage, puis introduites dans les bras de la machine. L'action d'une pédale déclenche pour chacun des points à réaliser un cycle complet qui comprend les phases suivantes :

- **l'accostage** : les électrodes se rapprochent et viennent se serrer sur les pièces à souder à l'endroit prévu et sous un effort donné ;
- **le soudage** : le courant passe, déclenché par la fermeture du contacteur du circuit de puissance ;
- **le forgeage ou maintien** d'effort à la fin duquel les électrodes s'écartent et reviennent au repos. Ces différentes phases, dont la durée totale reste de l'ordre de quelques secondes selon les épaisseurs, sont rigoureusement temporisées et se déroulent automatiquement. Au coup par coup, la machine ne réalise qu'un cycle et il faut appuyer de nouveau sur la pédale pour en réaliser un autre. À la volée, la machine fonctionne d'une manière répétitive, chaque cycle étant séparé du précédent par un intervalle de temps ou temps mort qui permet à l'opérateur de déplacer la pièce à souder. Sa durée détermine ainsi la cadence de travail.

L'ensemble de ces phases est appelé cycle de soudage.[2]

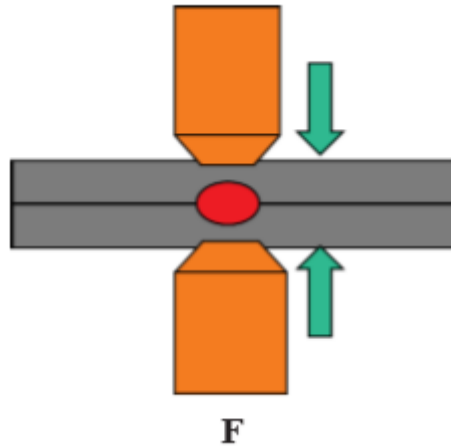


Figure I.1 : Soudage par points [2]

III. PARAMETRES DE SOUDAGE

Les paramètres de soudage doivent être adaptés en fonction des caractéristiques des tôles à souder.

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 **courant de soudage** est évidemment un paramètre décisif, car il intervient au carré dans l'énergie dissipée par effet Joule. L'intensité efficace à délivrer (typiquement entre 5 et 20 kA) dépend, là encore, des propriétés mécaniques, de l'épaisseur des tôles à souder ainsi que de la présence ou non de revêtement. On utilise généralement un courant alternatif monophasé à 50 Hz, dont la valeur moyenne efficace sur une soudure peut être réglée par rapport à la valeur de consigne, par un dispositif électronique adapté. Comme il est possible d'utiliser d'autres types de courants, notamment le courant continu, obtenu par redressement et filtrage, à partir d'un générateur 1000 Hz.

Le **temps de soudage** intervient au premier ordre dans l'énergie électrique dissipée. Ce paramètre, d'une valeur typique de quelques dixièmes de seconde, est donc, lui aussi, adapté aux propriétés des tôles à souder. Lorsque le temps de soudage désiré est particulièrement long, on le découpe en pulsations ou temps chauds séparés par des 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.[3]

IV. PRINCIPE DE BASE DU PROCEDE

Les pièces à souder sont superposées et sont serrées localement entre deux électrodes en alliage de cuivre. L'ensemble pièces / électrodes est traversé par un courant de soudage qui provoque une élévation de température par effet de joule et la fusion localisée des deux pièces dans la zone de positionnement des deux électrodes, ce qui crée, après solidification, un point de soudure.[4]

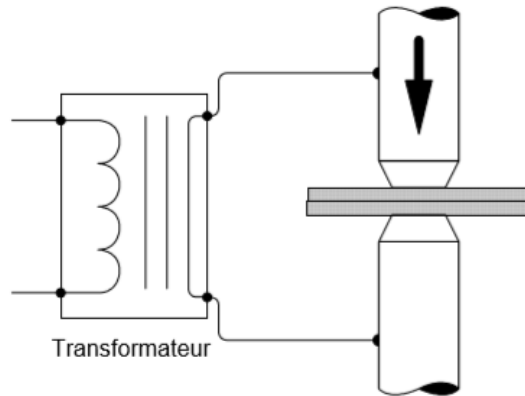


Figure I.2 : Principe du soudage par points.[4]

V. RAPPEL DE BASE D'ELECTRICITE

Loi de Joule : Lorsqu'un courant électrique parcourt un conducteur, la quantité de chaleur dégagée est proportionnelle au carré de l'intensité du courant et au temps.

$$W \text{ (en joules)} = R \text{ (Ohm)} \times I^2 \text{ (Ampères)} \times t \text{ (secondes)} \quad (1)$$

La résistivité est l'opposition (Figure I.3) d'un matériau au passage du courant électrique. Les électrodes en cuivre présentent une résistivité faible (1,7micro-ohm/cm/cm² contre 8 pour une tôle standard de 1mm).[4]

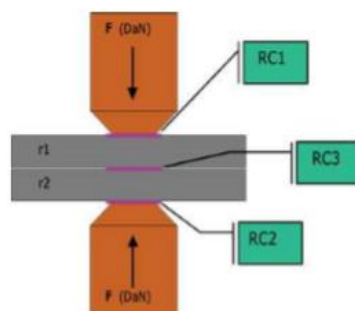


Figure I.3 Mécanisme de formation de point de soudure de soudage par point. [4]

Définition de R :

$$R = RC1 + RC2 + RC3 + r1 + r2 \quad RC1 + RC2 + RC3 > r1 + r2 \quad (2)$$

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Dont RC = Résistance de contact et r = Résistance interne

Les résistances de contacts $RC1$, $RC2$ et $RC3$ dépendent de :

- L'état de surface des tôles, la nature des tôles, la nature et forme des électrodes.[4]

5.1. MECANISME DE FORMATION DE LA SOUDURE

La chaleur servant à faire fondre l'acier au niveau du contact tôle-tôle (Figure I.4) est créée par effet Joule durant le passage du courant dans les conducteurs. La quantité de chaleur dégagée pendant la durée t en fonction de l'intensité du courant et de la résistance électrique traversée

$$Q = \int RI^2 dt$$

est donnée par la relation : (3)

Où

' Q ' est la quantité de chaleur générée en joules

' R ' est la résistance électrique dynamique globale des pièces, en ohm

' I ' est l'intensité de courant de soudage en ampère

' t ' est le temps de passage du courant en seconde.[4]

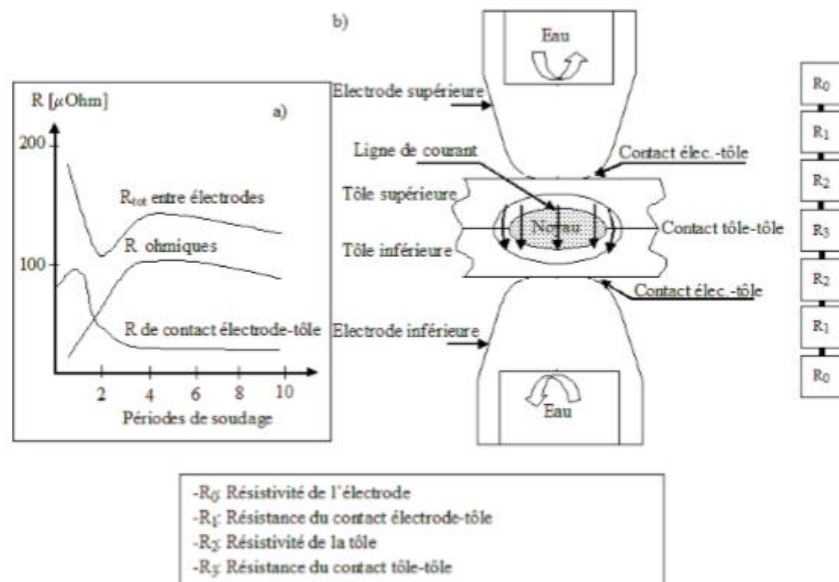


Figure I.4: Illustration des phénomènes électriques dans le procédé de soudage par points ; (a)

Evolution des résistances en cours de soudage d'un assemblage de tôles nues, (b) Circuit électrique équivalent d'un assemblage de deux tôles nues.[5]

5.2. DEROULEMENT DU CYCLE DE SOUDAGE

Un cycle de soudage se décompose en phases suivantes :

• **l'accostage** : les électrodes se rapprochent et viennent comprimer les pièces à souder, à l'endroit prévu et sous un effort donné. Dans le cas des machines du CRDM, seule l'électrode supérieure se rapproche, l'autre étant fixe. Cette phase se termine quand la valeur d'effort nominale est atteinte,[4]

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Tableau I.1 : Effets du temps d'accostage [4].

Un temps d'accostage trop court provoque :	Un temps d'accostage trop long provoque :
points brûlés, des projections de métal en fusion	Un ralentissement de la cadence
Des éclatements aux électrodes	
Des points sans résistance mécanique	
Une usure anormale des électrodes	

•**Effort** : pendant le passage du courant, l'effort maintient (Tableau I.2) le bon accostage et s'oppose à la destruction, sous l'influence de la dilatation du creuset contenant le noyau de métal en fusion.

Tableau I.2 : Effets de l'effort [4].

Un effort trop important provoque :	Un effort insuffisant provoque :
Une réduction des résistances	Une augmentation des résistances
Des points trop petits ou collés	Des projections de métal en fusion / points brûlés
Un écrasement ou emboutissage des bossages	Une usure anormale des électrodes

• **le soudage** : le courant passe, déclenché par la fermeture du contacteur du circuit de puissance, et doit, par effet Joule, produire assez de chaleur à l'interface tôle-tôle pour qu'une zone fondue apparaisse,[4]

• **Temps de soudage** : les temps en soudage par résistance (Tableau I.2) sont exprimés soit en milliseconde, soit en période : La période (Figure I.7) correspond à 20ms pour une fréquence réseau de 50Hz (ou 16,66ms pour 60Hz) [2].

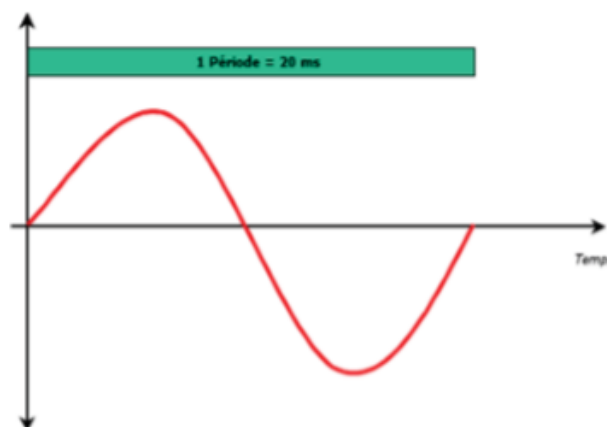


Figure I.5 Temps de maintien exprimés en milliseconde et en période [4]

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

• **Intensité** : l'intensité du courant de soudage par résistance (Tableau I.3) exprimé en kilo Ampère (KA) est le facteur majeur pour la formation d'un point de soudure [6].

Tableau I.3 : Effet de l'intensité [4].

Une intensité trop forte provoque :	Une intensité insuffisante provoque :
Un cuivrage des tôles	Pas ou peu de fusion
Des projections de métal en fusion, une indentation trop importante	Soudage réalisé mauvais
Une détérioration rapide des électrodes	

• **le forgeage** : effectué avec maintien de l'effort mais sans passage de courant, il permet au noyau fondu de se refroidir et de se solidifier en restant confiné, le but de son application est [2] :

- Diminuer le volume de retassure. Affiner le grain du métal
- Augmenter les caractéristiques mécaniques. Limiter les défauts internes

Tableau I.4 : Effets du temps maintien [2].

Un temps trop long provoque :	Un temps trop court provoque :
Un cuivrage des tôles	Pas ou peu de fusion
Des projections de métal en fusion, une indentation trop importante	Soudage réalisé mauvais
Une détérioration rapide des électrodes	
Un collage des électrodes sur la tôle	

• **la remontée de l'électrode** : l'ensemble des deux tôles peut alors être translaté afin de procéder à la soudure d'un nouveau point.[4]

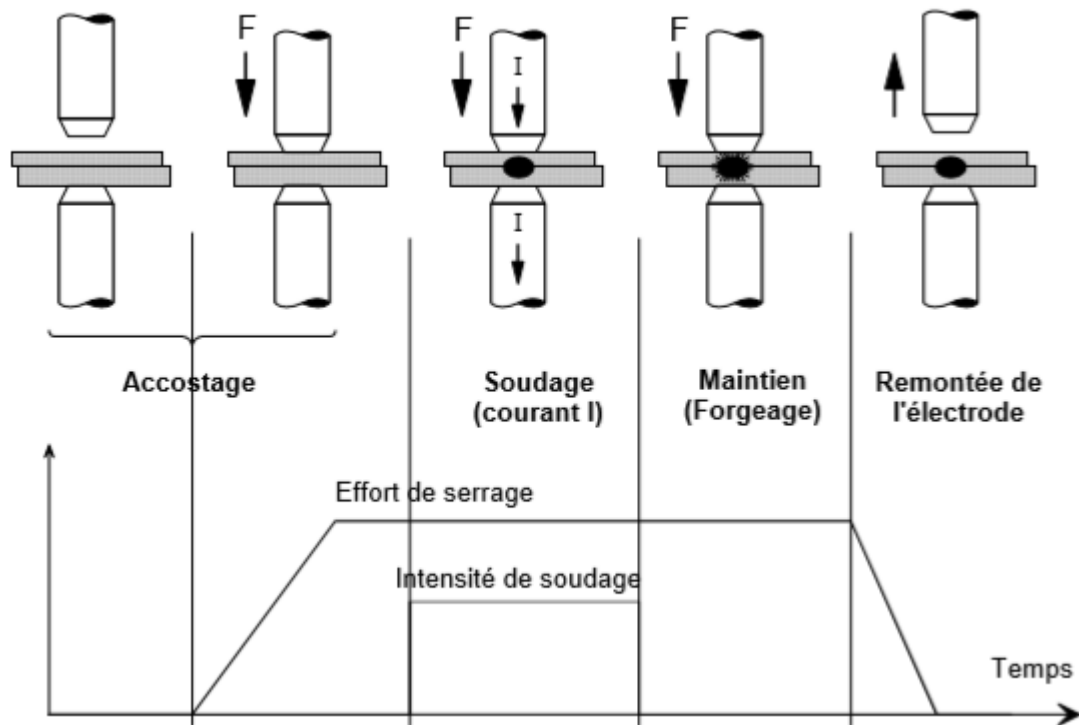


Figure I.6 Les différentes phases d'un cycle de soudage [4]

Ces différentes phases, dont la durée totale reste de l'ordre de quelques secondes selon les épaisseurs, sont rigoureusement temporisées et se déroulent automatiquement.[1]

VI. ELECTRODES

Le métal employé pour la fabrication des électrodes doit présenter les caractéristiques suivantes :

- Une très bonne conductivité afin d'opposer la résistance au courant le plus faible possible
- Une bonne conductibilité thermique pour une dissipation rapide de la chaleur.
- Des propriétés mécaniques afin d'éviter la fissuration sous l'effet du martelage. Il est nécessaire que le métal possède une dureté optimale à chaud, ce qui ne signifie pas dureté maximale que l'on pourrait lui conférer par écrouissage. Le métal doit être suffisamment dur pour ne pas s'écraser sous l'effort de compression, et conserver cette dureté optimale en cours de service pour que l'électrode ne soit pas sujette à un adoucissement qui la rendrait rapidement inutilisable.

Parmi ces métaux, le plus intéressant par l'étendue de ses possibilités d'utilisation est le cuivre au chrome à faible teneur en zirconium (0,02 à 0,10% Zr). De par sa composition, cet alliage possède les qualités fondamentales précitées. En outre, ses propriétés mécaniques son encore

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

nettement renforcées du fait que son élaboration particulière lui confère une structure à cristaux orientés en longues fibres. Par exemple, sa dureté à chaud et sa résistance à l'adoucissement sont sensiblement plus favorables que celles des alliages cuivre-zirconium courants, cuivre-chrome. On utilise parfois aussi des formats de pointes d'électrode (Figure I.5) à face active sphérique. Cette pratique est particulièrement préconisée dans le soudage d'alliages légers ou pour le soudage des tôles d'acier de fortes épaisseurs.[2]



Figure I.7 Exemple des différents formats d'électrode [4]

VII. CARACTERISTIQUES D'UN POINT SOUDÉ

VII.1. GEOMETRIE D'UN POINT SOUDE

La géométrie d'un point soudé présente trois particularités :

- discontinuité de l'assemblage,
- présence d'une entaille concentrant les contraintes en cas de sollicitations mécaniques,
- indentation, par pénétration de l'électrode, des faces externes de l'assemblage.[5]

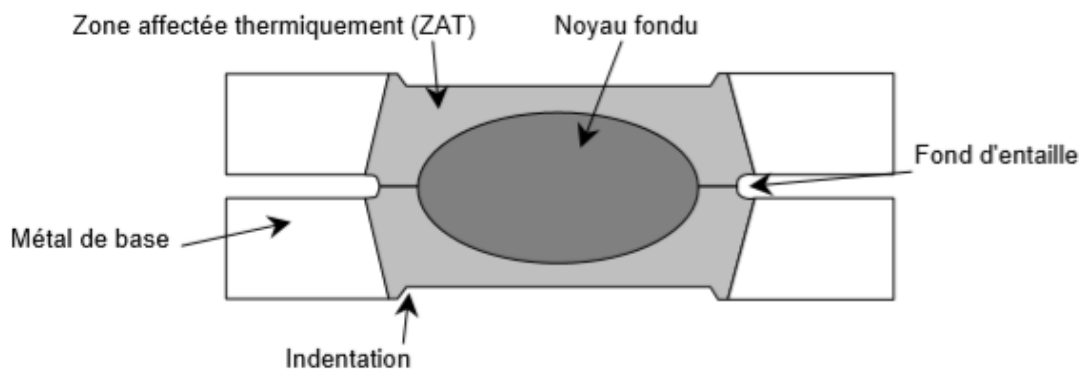


Figure I.8 Coupe d'un point soudée.[5]

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Qualitativement, on constate que les caractéristiques mécaniques de la soudure sont principalement influencées par la taille du noyau fondu, et en particulier par son diamètre dans le plan des deux tôles.

Si la puissance électrique fournie est trop faible, le noyau fondu est trop petit, voire inexistant, et les caractéristiques mécaniques du point soudé risquent d'être insuffisantes. Plus on augmente la puissance fournie, plus la zone fondue est étendue et plus le point est résistant aux contraintes mécaniques. Cependant, passé un certain seuil, le noyau fondu atteint soit le fond d'entaille soit une des faces extérieures de la tôle : sous l'effet de la pression mécanique exercée par les électrodes, on assiste alors à une éjection de métal fondu (phénomène dit "d'expulsion") : la qualité du point soudé s'en trouve dégradée.[7]

VII.2. MICROSTRUCTURES DU POINT SOUDE

L'opération de soudage par points se caractérise par un cycle thermique très rapide (Figure I.9) qui modifie profondément la microstructure du métal de base au voisinage du point soudé. Le métal subit un chauffage à des vitesses de l'ordre du millier de degrés Celsius par seconde jusqu'à une température pouvant aller au-delà de la température de fusion. Il s'en suit immédiatement un refroidissement très rapide dont la vitesse dépend des paramètres de soudage. Un cycle de soudage par point complet est typiquement effectué en moins d'une seconde [5]. Au niveau microstructural, on distingue plusieurs zones, illustrées schématiquement à la Figure I.9 :

- La zone associée au métal de base MB : la température atteinte dans cette zone est restée en dessous de 600°C environ si bien qu'on ne détecte pas de modification structurale visible.
- La zone subcritique SCZAT : zone où la température maximale atteinte est comprise entre environ 600°C et Ac1. On n'observera globalement aucun effet sur la taille des grains mais certaines modifications métallurgiques peuvent déjà avoir lieu selon l'état initial. Au chauffage, une partie du carbone peut être remis en solution. Au refroidissement, on peut observer de la précipitation-coalescence en présence d'éléments dispersoïdes, des phénomènes de revenu (de la martensite du métal de base par exemple) en fonction de la vitesse de refroidissement.[4]
- La zone inter critique ICZAT (Inter-Critical HeatAffected Zone) : zone où la température est arrivée entre Ac1 et Ac3. L'austénitisation partielle (coexistence de la ferrite α et de l'austénite γ) conduit à des modifications importantes de la microstructure.

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

- La zone à grains fins GFZAT : (Fine Grained Heat Affected Zone) zone de température entre A_{c3} et 1100°C environ. D'après le diagramme d'équilibre Fe-C, l'austénitisation est totale dans cette zone. Dans le cas du soudage, A_{c3} peut être décalé par la rapidité du cycle thermique. Au chauffage, la nouvelle structure austénitique, non homogène et globalement fine, remplace la microstructure initiale. Suite au refroidissement rapide, on observera généralement une structure bainito-martensitique fine avec éventuellement quelques hétérogénéités.[4]
- La zone à gros grains GGZAT : zone entre 1100°C environ et la température de fusion. Au chauffage, on assiste à une forte croissance du grain austénitique qui confère à cette zone une forte trempabilité. La microstructure obtenue après refroidissement rapide est en général martensitique et homogène.[4]
- Zone fondue ZF : outre une fine zone de liaison (difficilement observable) constituée par la zone semi-solide, la dernière zone est la zone fondue, où la température a dépassé la température de liquidus. La microstructure observée après refroidissement rapide sera dendritique, grossière au centre du point et plus fine en bordure de noyau. On peut observer de la ségrégation inter dendritique.[4]

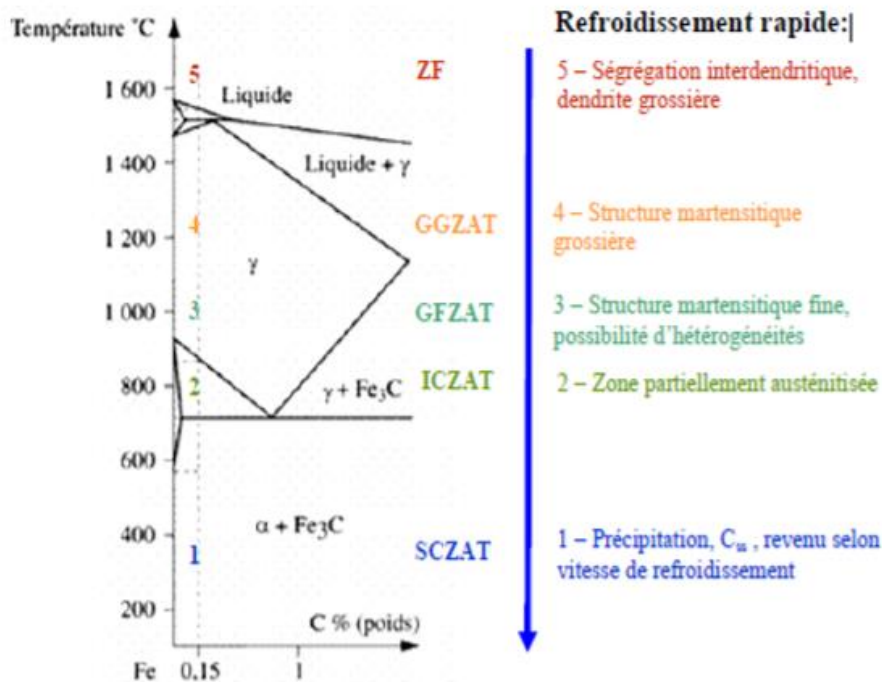


Figure I.9: Microstructures générées par l'opération de soudage.[1]

VII.3. DISTANCE ENTRE CHAQUE POINT

La distance entre deux points de soudure doit être $10 \times \text{épaisseur} + 10\text{mm}$ pour éviter « l'effet de shunt » du courant de soudage.[7]

C'est quoi « l'effet de SHUNT » ?

L'effet de shunt c'est lorsque la distance entre points de soudure n'est pas respectée et le courant au lieu de passer d'une électrode à l'autre au travers d'une pièce à assembler le courant passe par le précédent point déjà existant sans réaliser un point de soudure. La conséquence : Aucun point de soudure ne se réalise.[7]

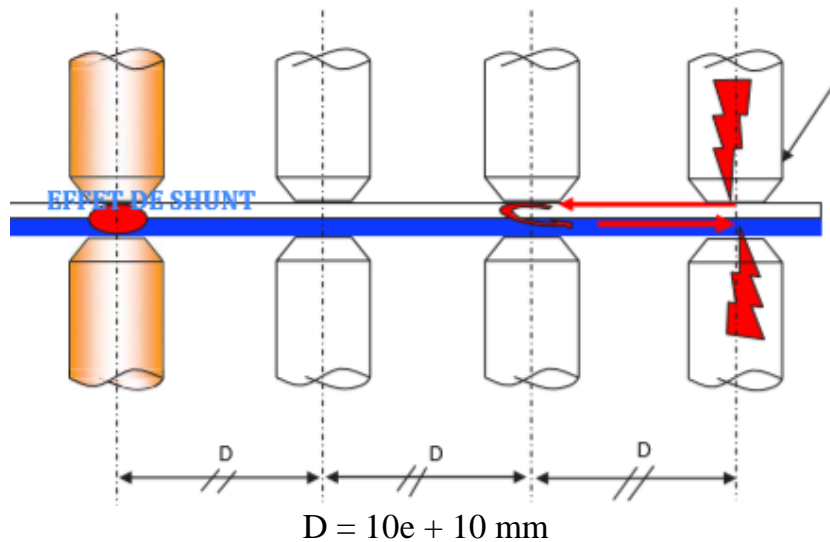


Figure I.10: Distance entre chaque point.[7]

VII.4 Distance minimale entre le point de soudure et le bord de la pièce

La distance entre la rive de la pièce et le point de soudure doit être d'environ 2 fois l'épaisseur minimale +4 mm pour éviter un éclatement du point de soudure sous l'effet de la pression hydrostatique du noyau en fusion.

VII.5. SOUDABILITE

Il présente une excellente soudabilité par points, aussi bien pour des assemblages homogènes qu'hétérogènes, tant à 50 Hz qu'à 1000 Hz. Les domaines de soudabilité sont larges et les tenues mécaniques des assemblages (traction, cisaillement) sont conformes aux exigences des constructeurs automobiles et aux normes. Grâce à la nature de la couche alliée obtenue après emboutissage à chaud, la durée de vie des électrodes de soudage est considérée comme très bonne (plusieurs milliers de points sans dégradation) par rapport aux revêtements métalliques conventionnels. En raison d'une très haute résistance mécanique et d'une faible ductilité, on observe avec l'utilisation de paramètres de soudage standards des projections de

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

soudure qui peuvent conduire à des défauts de type fissuration et une dégradation de la surface du point soudé. Afin de limiter ces défauts, on préconise une intensité (Figure I.11) de soudage relativement bas avec un temps de soudage plus conséquent (Figure I.12) et enfin un effort de serrage plus élevé (Figure I.13). On pourra également augmenter le diamètre de la face active de l'électrode de manière à réduire la densité de courant par rapport à la surface.[4]

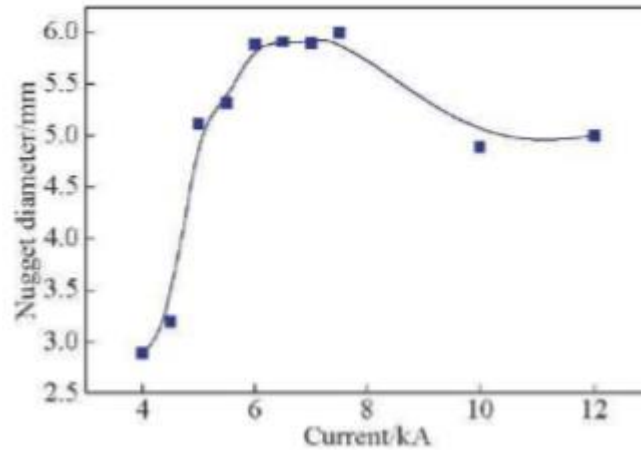


Figure I.11 : Effets du courant de soudage sur le diamètre du noyau soudé [4].

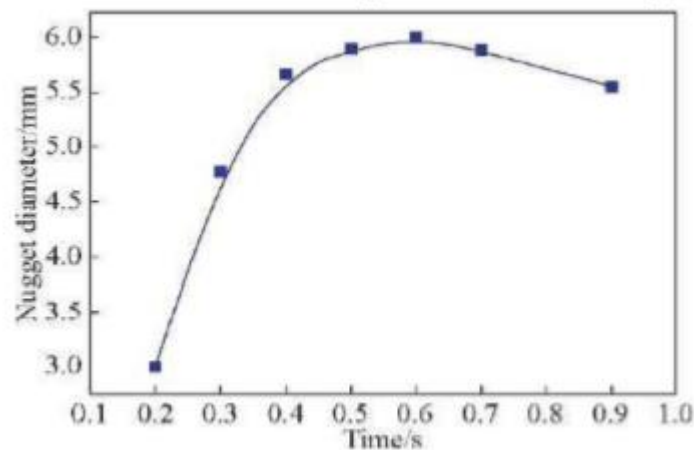
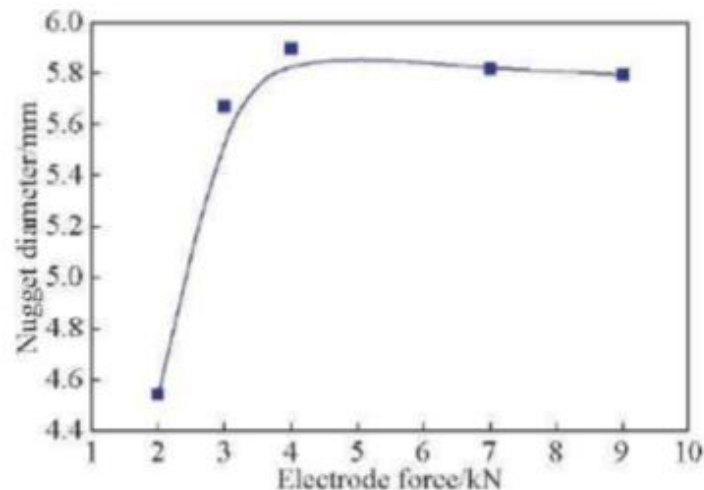


Figure I.12 : Effets du temps de soudage sur le diamètre du noyau [4].



CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Figure I.13 : Effets de l'effort aux électrodes sur le diamètre du noyau soudé [4].

- a) **Soudabilité opératoire** : Elle s'appuie sur un ensemble de condition qui permet d'assurer sans problème l'opération de soudage :

Fiabilité : mécanique, électrique, thermique des machines.

Matériau de qualité suivie : résistivité, conductivité. Aspect de surface (calamine, rouille)

La notion de COEFFICIENT D'APTITUDE AU SOUDAGE PAR RESISTANCE aide à définir priori la soudabilité opératoire des matériaux.[1]

[1]

$$C.A.S.P.R. = \frac{\text{Resistivité}}{\text{temps de fusion} \times \text{conductivité thermique}} \quad (4)$$

L'aptitude au soudage par résistance croit avec la valeur du C.A.S.P.R

L'aluminium = 0.76 Nickel = 4.66 Acier doux = 6.35 Inox = 144

- b) **Soudabilité métallurgique** : Malgré l'obtention de la liaison, l'assemblage peut ne pas donner satisfaction pour des raisons métallurgique. Compte tenu des matériaux en présence et du cycle thermique » assemblage peut être faible.[1]

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

Le procédé de soudage par points est le procédé le plus connu parmi aux autres procédés de soudage par résistance dans les industries légères et lourdes. Ceci est dû à sa facilité d'utilisation et les caractéristiques mécanique qui peu obtenue par ce dernier.[1]

REFERENCES

- [1] AISSAOUI Fethi, (2018). « Comportement mécanique des soudures par points ». Effets d'arrangement des points de soudures dans le cas des tôles en acier inoxydable. Mémoire pour le Diplôme de MASTER En GENIE MECANIQUE Option : Assemblages soudés et matériaux. UNIVERSITE de ABOU BEKR BELKAID TLEMEN, Algérie.8,15,24,25,27
- [2] « Livret Soudage par Resistance » SD sevice édition (2016). 70,85
- [3] Ferederique Rossillon, (2007). « Influence des conditions de soudage sur le comportement en fatigue d'un acier THR dual phase soudé par point ». Thèse de Doctorat, Université balaise pascal.50
- [4] ZIANI Belkheir,(2019). «Comportement mécanique d'un assemblage soudé en "Peel joint». Mémoire pour le Diplôme de MASTER En GENIE MECANIQUE Option : Assemblages soudés et matériaux. UNIVERSITE de ABOU BEKR BELKAID TLEMEN, Algérie.5,6,7,8,10,11,12.
- [5] LARBI CHERIF MOHAMMED, (2016) « COMPORTEMENT MECANIQUE D'ASSEMBLAGES ». Mémoire pour le Diplôme de MASTER En GENIE MECANIQUE Option : Assemblages soudés et matériaux. UNIVERSITE de ABOU BEKR BELKAID TLEMEN, Algérie.21,23,24
- [6] Kim HR§ Lee K Y , (2009) . «A pplication of Taguchi method to determine hybrid welding conditions of aluminium alloy», J Sci Ind Res, 68 296-300;
- [7] EMBAREK Djamel, (2019). « Effets combinés des paramètres de soudage et paramètres géométrique des joints soudés par point ». Mémoire pour le Diplôme de MASTER En GENIE MECANIQUE Option : Assemblages soudés et matériaux. UNIVERSITE de ABOU BEKR BELKAID TLEMEN, Algérie.18,21

Chapitre II
METHODE D'OPTIMISATION DE
TAGUCHI

CHAPITRE II : METHODE D'OPTIMISATION DE TAGUCHI

I. INTRODUCTION

La méthode Taguchi, inventée par Genichi Taguchi, est une méthode statistique pour réaliser des plans d'expériences. Appliquée dans l'industrie, cette méthode se concentre avant tout à minimiser les variations autour de la valeur de consigne. L'objectif est d'obtenir des produits, processus et systèmes aussi robustes et insensibles aux perturbations externes que possible.

La méthode Taguchi est appliquée dans le cadre de l'amélioration de la qualité et de la méthode Six Sigma. Cette méthode pragmatique a su rendre les plans d'expériences accessibles pour des techniciens.

La méthodologie Taguchi permet de garantir la robustesse des fonctions d'un produit en agissant sur les paramètres influents de son processus d'élaboration compte-tenu de ses conditions d'utilisation.

Depuis les quatre dernières décennies, il y a eu des limites lorsque des techniques de conception expérimentale conventionnelle ont été appliquées à l'expérimentation industrielle. Le Dr Genichi Taguchi, un ingénieur japonais, a mis au point une nouvelle méthode connue sous le nom de conception de tableaux orthogonaux, qui ajoute une nouvelle dimension à la conception expérimentale conventionnelle. Taguchi DOE sont notés par « Labc » où « La » les tableaux orthogonaux de variables ou de matrice de conception, « b » les niveaux de variables et « c » nombre de variables. La méthode Taguchi est une méthode largement acceptée de DOE qui a prouvé en produisant des produits de haute qualité à faible coût par la suite.

Cette méthode est régulièrement utilisée dans les industries de l'automobile, de l'électronique et d'autres produits de transformation. L'objectif de la méthode Taguchi est de déterminer les paramètres optimaux des paramètres d'entrée, en négligeant la variation causée par des facteurs incontrôlables ou des facteurs sonores [1]. Le facteur ici se réfère à une variable d'entrée par laquelle l'état peut être contrôlé pendant l'expérience. Méthode Taguchi, une application systématique dans la conception et l'analyse d'expériences, est utilisée pour concevoir et améliorer la qualité des produits. Il est devenu un outil puissant pour améliorer la productivité pendant la recherche et le développement afin que les produits de haute qualité puissent être produits à des coûts réduits [2]. Cependant, la méthode d'origine Taguchi a été conçue pour optimiser une seule caractéristique de performance. En outre, l'optimisation de multiples caractéristiques de performance est beaucoup plus compliquée que l'optimisation

CHAPITRE II : METHODE D'OPTIMISATION DE TAGUCHI

d'une seule caractéristique de performance [1 ,2]. Bien que similaire au DOE, la conception Taguchi ne conduit que les combinaisons expérimentales équilibrées (orthogonales), ce qui rend la conception Taguchi encore plus efficace qu'une conception factorielle fractionnelle. En utilisant la technique Taguchi, les industries sont en mesure de réduire considérablement le temps de cycle de développement des produits pour la conception et la production réduisant ainsi les coûts et augmentant les profits [1]

Taguchi a proposé que l'optimisation technique d'un processus ou d'un produit soit effectuée dans une approche en trois étapes :

Conception du système,

Conception des paramètres et

Conception de la tolérance.

Dans la conception du système, l'ingénieur applique des connaissances scientifiques et techniques pour produire un prototype fonctionnel de base. L'objectif de la conception des paramètres est d'optimiser les paramètres des valeurs de paramètres du processus pour améliorer les caractéristiques de performance et d'identifier les valeurs de paramètres du produit dans les valeurs optimales des paramètres de processus.

La conception du paramètre, les étapes incluses sont les suivantes :

- ✓ Sélection du tableau orthogonal approprié (OA) en fonction du nombre de facteurs contrôlables (paramètres) ; des expériences en cours d'exécution basées sur l'œd de l'œd de presse ;
- ✓ L'analyse des données ;
- ✓ Identifier l'état optimal ;

- ✓ Et la confirmation fonctionne avec les niveaux optimaux de tous les paramètres. Les principaux effets indiquent la tendance générale de l'influence de chaque paramètre.

La conception de tolérance, est une étape pour affiner les résultats de la conception des paramètres

CHAPITRE II : METHODE D'OPTIMISATION DE TAGUCHI

La connaissance de la contribution des paramètres individuels est la clé pour décider de la nature du contrôle à établir sur un processus de production.[3]

La théorie du système gris proposée par Deng (1989) [4] s'est avérée utile pour traiter les informations pauvres, incomplètes et incertaines. L'analyse relationnelle Grey peut être utilisée pour résoudre efficacement les interrelations compliquées entre les multiples caractéristiques de performance. Par cette analyse, une note relationnelle Grise est obtenue pour évaluer les multiples caractéristiques de rendement. Par conséquent, l'optimisation des caractéristiques de performance multiples compliquées peut être convertie en optimisation d'une seule catégorie relationnelle Grey.[5]

II. ANALYSE DE VARIANCE

Analyse de variance (ANOVA) est le traitement statistique le plus couramment appliqué aux résultats des expériences pour déterminer la contribution en pourcentage de chaque paramètre par rapport à un niveau de confiance déclaré [5] Taguchi suggère deux voies différentes pour effectuer l'analyse complète. Dans l'approche standard, les résultats d'une seule série ou de la moyenne des exécutions répétitives sont traités par l'effet principal et ANOVA (analyse des données brutes). La deuxième approche, que Taguchi recommande fortement pour plusieurs courses est d'utiliser le rapport Signalto-Noise (signale /bruit) (S/N) pour les mêmes étapes de l'analyse.[6]

III. APPLICATION DE LA METHODE TAGUCHI

Les étapes de la méthode Taguchi sont les suivantes :

1. Identification de la fonction principale, à optimiser et ses effets secondaires et le mode de défaillance.
2. Identification des facteurs sonores, des conditions d'essai et des caractéristiques de qualité.
3. Identification de la fonction principale à optimiser.
4. Identifier les facteurs de contrôle et leurs niveaux.
5. Sélection du tableau orthogonal et de l'expérience de matrice.
6. Réalisation de l'expérience de matrice.
7. Analyse des données et prédiction du niveau optimal.
8. Détermination de la contribution des paramètres sur la performance.
9. Effectuer l'expérience de vérification et planifier l'action future.[7]

IV. ANALYSE DE VARIANCE DE LA METHODE DE TAGUCHI

a. Paramètre de soudage par résistance

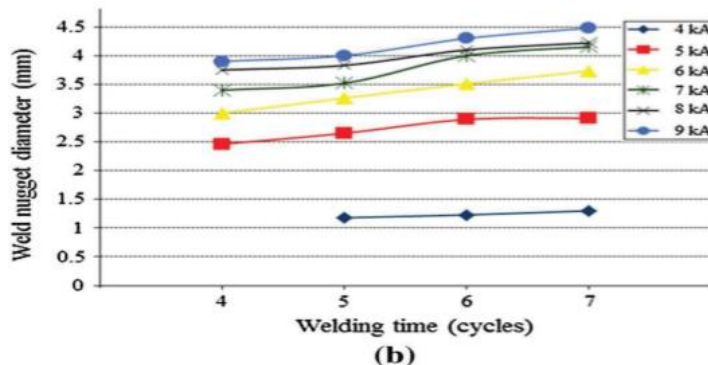
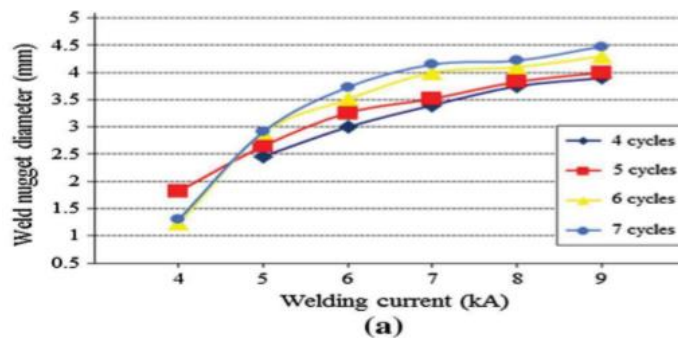
Les paramètres sont unis entre les procédés de la soudure par résistance mention d'entre eux ou plus particulièrement :

- L'intensité de soudage
- Le temps de soudage
- L'effort sur électrodes.
- Le temps de forgeage
- Forme de l'électrode
- Diamètre de la face active de l'électrode
- Diamètre de l'électrode
- Course entre les électrodes.[8]

b. Effet du temps de maintien et le courant de soudage sur la taille du noyau et sur la pénétration

- L'effet du temps de maintien et le courant de soudage a été étudié par Kianersi et al, ils ont montré que la taille du noyau augmente avec augmentation du temps de soudage et l'intensité.

La raison principale est attribuable à l'apport de chaleur plus élevé, ce qui conduit à la formation d'un noyau plus grande.[9]



CHAPITRE II : METHODE D'OPTIMISATION DE TAGUCHI

Figure II.1 : effet (a) de courant de soudage et (b) souder le temps sur le diamètre de noyau.[9]

- L'effet du temps de maintien et le courant de soudage sur la pénétration a été étudié par Kianersi et al, ils ont montré que la pénétration augmente avec augmentation du courant de soudage jusqu' à 8 kA puis diminue pour un courant de soudage de 9 kA. Le même comportement a été détecté dans tous les échantillons.[9]

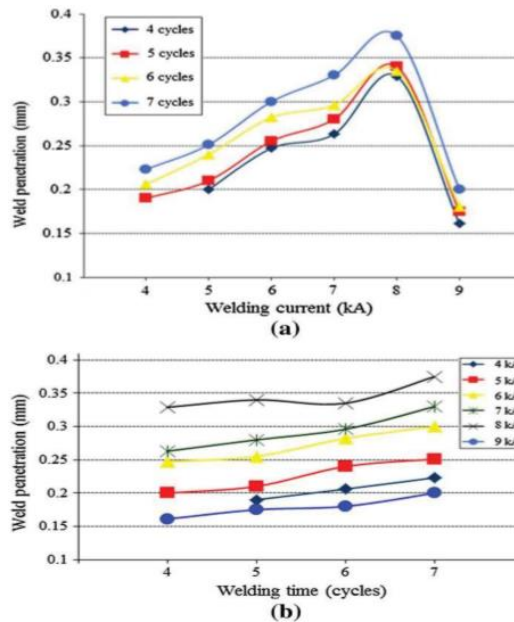


Figure II.2 : effet (a) de courant de soudage et (b) souder le temps sur pénétration de la soudure. [9]

c. Effet du courant de soudage et du temps de soudage sur le ZAT

- L'effet du temps de maintien et le courant sur la ZAT a été étudié par Kianersi et al, ils ont montré que La ZAT est la zone affectée par la quantité de chaleur perdu dans les échantillons soudés. La figure 4 illustre l'effet du courant de soudage sur la largeur et l'épaisseur de la ZAT.

Au fur et à mesure que la quantité de chaleur générée augmente avec l'augmentation du courant de soudage à un temps de maintien constant, la quantité de dissipation de chaleur qui aura lieu dans l'échantillon soudé devient plus grande.[9]

CHAPITRE II : METHODE D'OPTIMISATION DE TAGUCHI

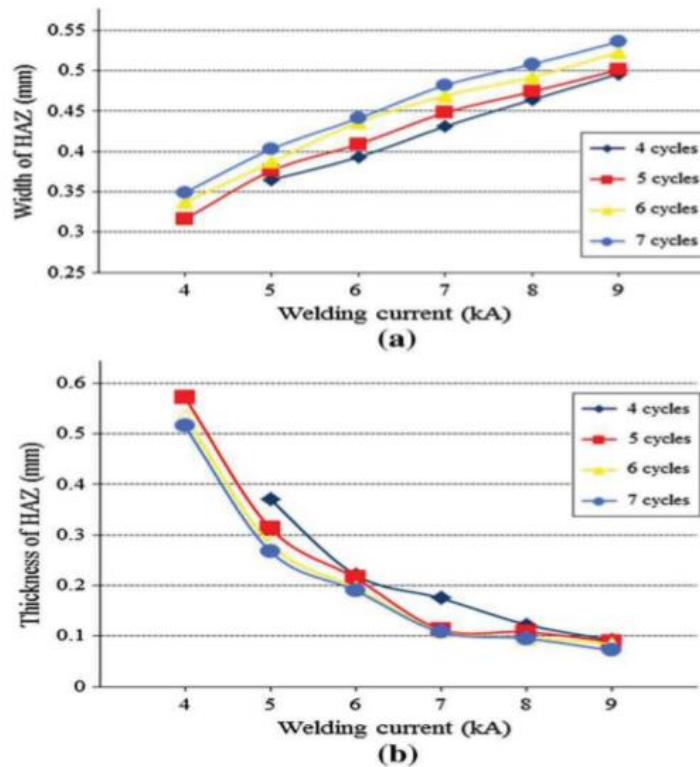


Figure II.3 : effet de courant de soudage sur (a) la largeur (b) l'épaisseur de la ZAT.[9]

d. Influence du courant de soudage sur la charge à la rupture

Influence de courant de soudage sur la charge à la rupture a été étudié par Kianersi et al, ils ont montré que la charge à la rupture augmente avec augmentation du courant de soudage.[8]

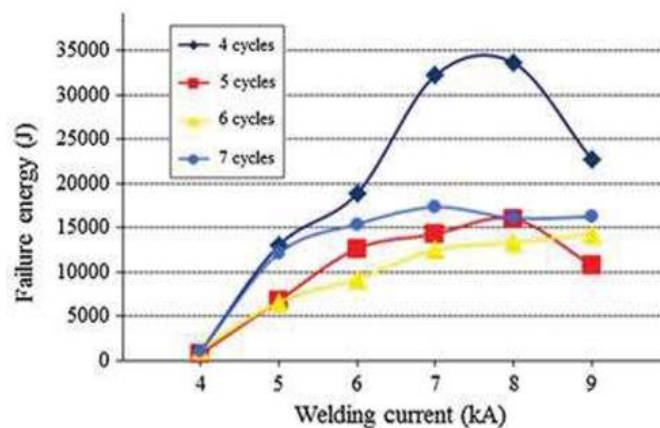


Figure II.4 : effet de (a) le courant de soudage et (b) souder le temps sur l'énergie des défauts.[9]

e. Influence de diamètre de noyau sur la résistance à la traction

Boriwal, et al étudier l'évolution de diamètre de noyau en fonction de la résistance à la traction il montre que l'augmentation de diamètre de noyau fait augmenter la résistance à la traction (figure 1.11).[9]

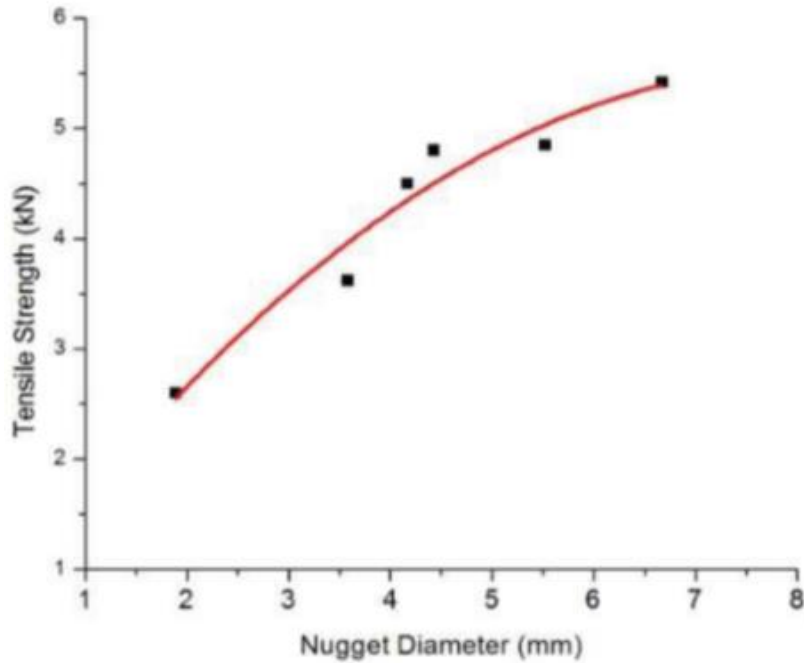


Figure II.5 : effet de diamètre de noyau sur la résistance à la traction de soudage par point.[9]

f. L'effet du temps de soudure sur le diamètre du noyau et la ZAT et sur la charge de cisaillement en traction

- L'effet du temps de soudure sur le diamètre du noyau et la ZAT a été étudié par Hayat et al, ils ont montré que la largeur du diamètre et de la ZAT augmente avec l'augmentation du temps de soudure.[9]

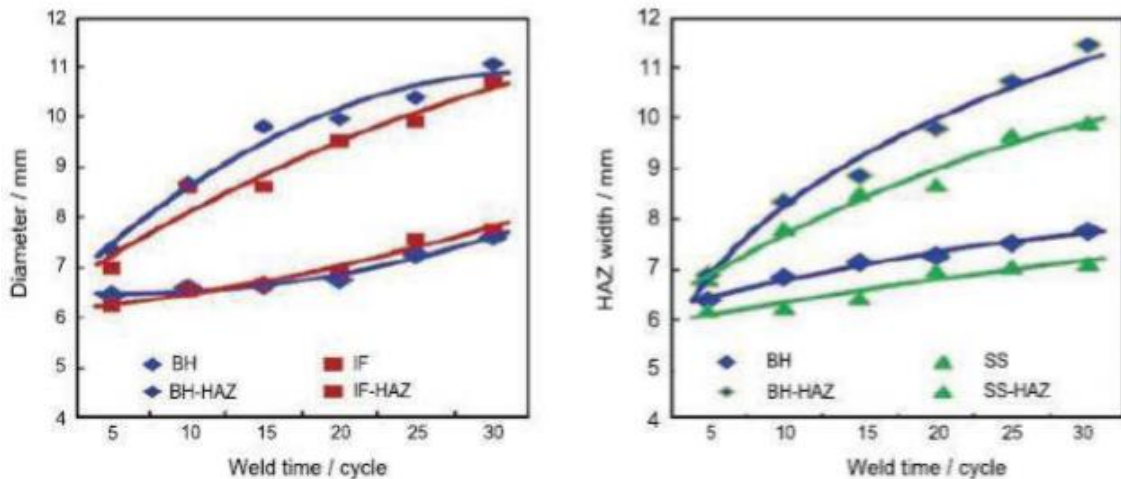


Figure II.6 : La variation du diamètre de noyau (a) et de la largeur de ZAT (b) avec le temps de soudure.[9]

- L'effet du temps de soudure sur la charge de cisaillement en traction a été étudié par Chhibber et al, ils ont montré que la charge de cisaillement en traction augmente avec l'augmentation du temps de soudure pour différentes intensités.[9]

CHAPITRE II : METHODE D'OPTIMISATION DE TAGUCHI

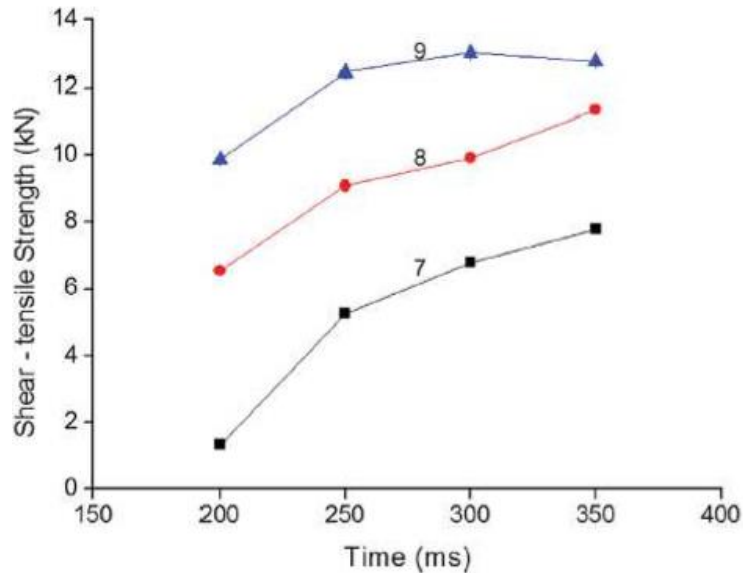


Figure II.7 : Résistance au cisaillement et à la traction en fonction du temps de soudage avec une variation du courant de soudage de 7, 8 et 9 kA à une force d'électrode de 3,5 Kn.[9]

V. AVANTAGE DE LA METHODE DE TAGUCHI

Parmi les avantages de la méthode Taguchi, nous citons :

- L'amélioration de la qualité : la stratégie de contrôle de qualité de Taguchi ne se limite pas à la qualité lors de la production, mais aussi à la qualité dès les premières phases du cycle de développement du logiciel.[2]
- la réduction des coûts : Taguchi dans sa définition de la qualité met l'accent sur le coût du produit. L'objectif est d'améliorer la qualité, mais pas à n'importe quel coût. C'est une méthode peu coûteuse dont la force de son utilisation réside dans son habilité à évaluer plusieurs facteurs de qualité dans un nombre minimum d'essais.[10]
- l'acquisition des connaissances : La méthode Taguchi est importante puisqu'elle prend en considération la résolution du problème et l'acquisition des connaissances. De la sorte, cette méthode contribuera à l'amélioration des pratiques en génie logiciel.[5]

VI. MODELISATION MATHEMATIQUE

6.1. Les plans d'expérience

Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles [5]. Ils sont applicables à de nombreuses disciplines et à toutes les industries à partir du moment où l'on recherche le lien qui existe entre une grandeur d'intérêt, y , et des variables, x_i . Il faut penser aux plans d'expériences si on s'intéresse à une fonction du type : $Y = f(X_i)$ [5] (5)

Avec les plans d'expériences on obtient le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences. Pour cela, il faut suivre des règles mathématiques et adopter une démarche rigoureuse [4]. Il existe de nombreux plans d'expériences adaptés à tous les cas rencontrés par un expérimentateur. Les principes fondamentaux de cette science seront indiqués et les principaux plans seront passés en revue. La compréhension de la méthode des plans d'expériences s'appuie sur deux notions essentielles, celle d'espace expérimental et celle de modélisation mathématique des grandeurs étudiées.[11]

6.1.1. Conditions d'application

Pour appliquer la méthode avec succès, il faut :

- Créer un groupe pluridisciplinaire constitué de personnes compétentes, concernées et motivées : ne pas oublier les expérimentateurs ;
- Associer un animateur formé à la méthode à un pilote, responsable technique du sujet traité ;
- Être en mesure d'expérimenter, de maîtriser les valeurs à donner aux paramètres et de mesurer avec précision la ou les réponses. La méthode devient lourde à utiliser lorsque les paramètres pris en compte sont trop nombreux (néanmoins il est rare que plus de 15 paramètres influencent grandement les réponses du système) ;
- Etablir une stratégie expérimentale (série de plans) en fonction des objectifs fixés, des moyens disponibles et du délai accordé à l'étude ;
- Respecter scrupuleusement la démarche décrite ci-après.

La méthode des plans d'expériences (MPE) cherche à déterminer une relation entre 2 types de grandeurs :

- **La réponse** : Qui correspond à la grandeur physique étudiée ;
- **Les facteurs** : Qui correspondent aux grandeurs physiques modifiables par l'expérimentateur et sensées influencer sur les variations de la réponse.[10]

6.2. Notion d'espace expérimental

Un expérimentateur qui lance une étude s'intéresse à une grandeur qu'il mesure à chaque essai. Cette grandeur s'appelle la réponse, c'est la grandeur d'intérêt. La valeur de cette grandeur dépend de plusieurs variables. Au lieu du terme « variable » on utilisera le mot facteur. La réponse dépend donc d'un ou de plusieurs facteurs. Le premier facteur peut être représenté par un axe gradué et orienté (Figure 8). La valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai est appelée niveau. Lorsqu'on étudie l'influence d'un facteur, en général, on limite ses variations entre deux bornes. La borne inférieure est le niveau bas. La borne supérieure est le niveau haut.[5]

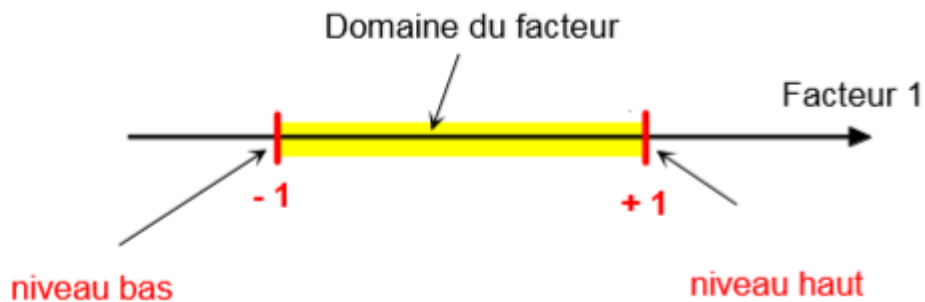
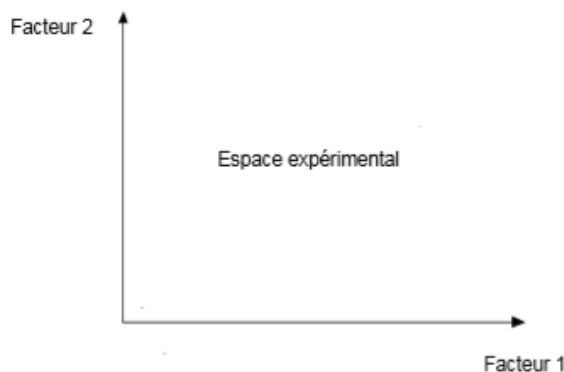


Figure II.8: Le niveau bas du facteur est noté par - 1 et le niveau haut par +1. Le domaine de variation du facteur est constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut.[5]

L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, s'appelle le domaine de variation du facteur ou plus simplement le domaine du facteur. On a l'habitude de noter le niveau bas par -1 et le niveau haut par $+1$. [5]

S'il y a un second facteur, il est représenté, lui aussi, par un axe gradué et orienté. On définit, comme pour le premier facteur, son niveau haut, son niveau bas et son domaine de variation. Ce second axe est disposé orthogonalement au premier. On obtient ainsi un repère cartésien qui définit un espace euclidien à deux dimensions. Cet espace est appelé l'espace expérimental (Figure 9).[5]



CHAPITRE II : METHODE D'OPTIMISATION DE TAGUCHI

Figure II.9: Chaque facteur est représenté par un axe gradué et orienté. Les axes des facteurs sont orthogonaux entre eux. L'espace ainsi défini est l'espace expérimental.[5]

Le niveau x_1 du facteur 1 et le niveau x_2 du facteur 2 peuvent être considérés comme les coordonnées d'un point de l'espace expérimental (Figure 10). Une expérience donnée est alors représentée par un point dans ce système d'axes. Un plan d'expériences est représenté par un ensemble de points expérimentaux.[5]

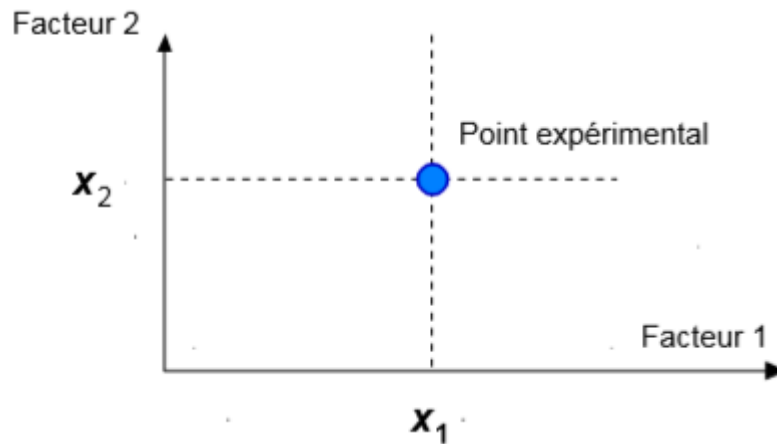


Figure II.10: Dans l'espace expérimental, les niveaux des facteurs définissent des points expérimentaux.[5]

Le regroupement des domaines des facteurs définit le « domaine d'étude ». Ce domaine d'étude est la zone de l'espace expérimental choisie par l'expérimentateur pour faire ses essais. Une étude, c'est-à-dire plusieurs expériences bien définies, est représentée par des points répartis dans le domaine d'étude (Figure 11). Cette façon de représenter une expérimentation par des points dans un espace cartésien est une représentation géométrique de l'étude. [5]

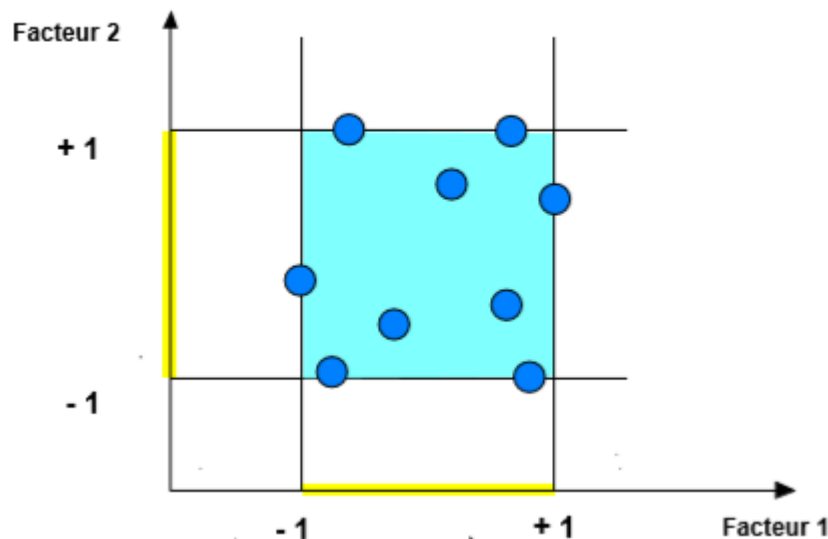


Figure II.11: Les points expérimentaux sont disposés dans le domaine d'étude défini par l'expérimentateur.[5]

CHAPITRE II : METHODE D'OPTIMISATION DE TAGUCHI

6.3. Notion de modélisation mathématique

On choisit a priori une fonction mathématique qui relie la réponse aux facteurs. On prend un développement limité de la série de Taylor-Mac Laurin. Les dérivées sont supposées constantes et le développement prend la forme d'un polynôme de degré plus ou moins élevé :

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \dots + \sum a_{ii} x_i^2 + a_{ij\dots z} x_i x_j \dots x_z \quad (6)$$

Où

- y est la réponse ou la grandeur d'intérêt. Elle est mesurée au cours de l'expérimentation et elle est obtenue avec une précision donnée.
- xi représente le niveau attribué au facteur i par l'expérimentateur pour réaliser un essai. Cette valeur est parfaitement connue. On suppose même que ce niveau est déterminé sans erreur (hypothèse classique de la régression).
- a0, ai, aij, aii sont les coefficients du modèle mathématique adopté a priori. Ils ne sont pas connus et doivent être calculés à partir des résultats des expériences.

L'intérêt de modéliser la réponse par un polynôme est de pouvoir calculer ensuite toutes les réponses du domaine d'étude sans être obligé de faire les expériences.[12]

Ce modèle est appelé "modèle postulé" ou "modèle a priori".

6.4. Système d'équations

Chaque point expérimental permet d'obtenir une valeur de la réponse. Cette réponse est modélisée par un polynôme dont les coefficients sont les inconnues qu'il faut déterminer. A la fin du plan d'expériences, on a un système de n équations (s'il y a n essais) à p inconnues (s'il y a p coefficients dans le modèle choisi a priori). Ce système s'écrit d'une manière simple en notation matricielle :

$$Y = Xa + e \quad (7)$$

Y est le vecteur des réponses.

X est la matrice de calcul, ou matrice du modèle, qui dépend des points expérimentaux choisis pour exécuter le plan et du modèle postulé.

a est le vecteur des coefficients.

e est le vecteur des écarts. [5]

VI. LES TABLES DE TAGUCHI

Les Tables de Taguchi sont des plans de Plackett et Burman dans lesquels on a remplacé +1 par 1 et -1 par 2. Les noms des plans ont également été traduits. Le plan 23 est la Table L8 et

CHAPITRE II : METHODE D'OPTIMISATION DE TAGUCHI

le plan 24 est la Table L16. Le plan de 12 essais, appelé Table L12, est un plan de Plackett et Burman. A l'origine ces plans étaient utilisés avec un modèle sans interaction. Aujourd'hui, certaines personnes leur appliquent les résultats et les principes de la théorie classique.[12]

7.1. Les plans de Plackett et Burmann

Les matrices de calcul des plans de Plackett et Burman [6] sont des matrices d'Hadamard. C'est-à-dire des matrices ayant 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36 lignes etc. Elles permettent donc des expérimentations ayant un nombre d'essais intermédiaire de celui des plans factoriels qui, eux, ont seulement 2^k lignes (4, 8, 16, 32, etc.). Les plans de Plackett et Burman sont le plus souvent saturés. Le modèle mathématique est alors un modèle sans interaction analogue à celui des plans de Koshal :

$$y = a_0 + \sum a_i x_i \quad (8)$$

VII. ANALYSE DE LA VARIANCE

Les valeurs des réponses doivent être analysées afin de mesurer l'influence des facteurs et des interactions sur la variation constatée de la réponse. La principale méthode statistique répondant à cet objectif est l'analyse de la variance. L'analyse de la variance (en anglais : Analysis Of Variance, ANOVA) nous permet de déterminer à partir de quel seuil un effet peut-être considéré comme significatif. Pour ce faire, il faut comparer la variation d'un facteur pris en compte dans le modèle avec la variance résiduelle. Lorsque le facteur n'est pas pris en compte dans le modèle, l'effet du facteur est alors contenu dans la variance résiduelle. La variation de la variance résiduelle permet de déterminer si globalement le facteur a une influence significative sur la réponse, c'est-à-dire si au moins une des variables associées à chacun des niveaux des facteurs a un effet non nul. La contribution de la variable x_i à la variation de y se détermine de différentes manières : [10]

a. 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) [10]

b. 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

CHAPITRE II : METHODE D'OPTIMISATION DE TAGUCHI

variations de la réponse en comparant les variations expliquées et celles non expliquées par le modèle :

- La variation expliquée de la réponse correspond à la variance induite par les facteurs et les interactions ;
- La variation inexpliquée de la réponse correspond à la variation résiduelle. La variance résiduelle σ^2 peut être décomposée en deux sources de variabilité :

La variabilité intrinsèque du système étudié ;

La variabilité due à des facteurs aléatoires non contrôlés au cours des essais.[10]

REFERENCES

- [1] Manjunath R. Rawal, (2012). «Application of Taguchi Method for Resistance Spot Welding of Stainless Steel-304 Grade». International Journal of Science and Research.22,26.
- [2] Thakur, A. G., & Nandedkar,(2010). « Application of Taguchi method to determine resistance spot welding conditions of austenitic stainless steel AISI 304». Journal of Scientific and Industrial Research.680,683.
- [3] Karna, S. K., Singh, R. V., & Sahai, R. (2015). « Application of Taguchi Method in Indian Industry Application of Taguchi Method in Indian Industry». 387,391.
- [4] Eschenlohr S & Lelièvre M, (2002) Stefan Friedrich, « China und die Europäische Union».Europas weltpolitische Rolle aus chincsischer Sicht. 89
- [5] Kim HR& Lee K Y , (2009) . «A pplication of Taguchi method to determine hybrid welding conditions of aluminium alloy». 68,296,300.
- [6] Patil, D. V, & Sankpal, G. A. (2014). « A Review on Effect of Spot Weld Parameters on Spot Weld Strength».3,8
- [7] Thakur, A. G., Rao, T. E., Mukhedkar, M. S., & Nandedkar, V. M. (2010). « Application of Taguchi method for resistance spot welding of galvanized steel». Journal of Engineering and Applied Sciences. 22,26.
- [8] Shome, M., & Chatterjee, S. (2009). «Effect of material properties on contact resistance and nugget size during spot welding of low carbon coated steels». ISIJ International.1384,1391.
- [9] EMBAREK Djamal, (2019). « Effets combinés des paramètres de soudage et paramètres géométrique des joints soudés par point ». Mémoire pour le Diplôme de MASTER En GENIE MECANIQUE Option : Assemblages soudés et matériaux. UNIVERSITE de ABOU BEKR BELKAID TLEMCEN, Algérie.18,21
- [10] Luo Yi, Liu Jinhe, Xu Huibin, Xiong Chengzhi, Liu Lin.(2009). «Regression modeling and process analysis of resistance spot welding of galvanized steel sheet». Materials and Design.2547,2555.
- [11] BOX George.E. P. , HUNTER William G. , HUNTER J. Stuart, (2005). «Statistics for Experimenters» deuxième édition. John Wiley and Sons. New-York.633
- [12] YOUNDEN W.J, (1951). «Statistical Methods for Chemists» .John Wiley and Sons. New-York. 126.

CHAPITRE II : METHODE D'OPTIMISATION DE TAGUCHI

[13] ZIANI Belkheir,(2019). «Comportement mécanique d'un assemblage soudé en "Peel joint"». Mémoire pour le Diplôme de MASTER En GENIE MECANIQUE Option : Assemblages soudés et matériaux. UNIVERSITE de ABOU BEKR BELKAID TLEMCEM, Algérie.5,6,7,8,10,11,12.

Chapitre III

**ETAT DE L'ART SUR LES EFFETS DES
PARAMETRES DE SOUDAGE PAR POINT**

CHAPITRE III : ETAT DE L'ART SUR LES EFFETS DES PARAMETRES DE SOUDAGE PAR POINT

I. INTRODUCTION

Le soudage par résistance par point est un procédé utilisé depuis de nombreuses années où son développement s'est effectué par une approche phénoménologique que théorique. La résistance statique ou cyclique d'un tel assemblage dépend de plusieurs facteurs :

- Diamètre du point de soudure (noyau du point de soudure)
- Epaisseurs des tôles assemblées
- Métal de base
- Contraintes résiduelles

Il est à noter que l'épaisseur des tôles assemblées et le métal de base présentent des facteurs de conception à choisir selon des conditions bien déterminées mais le niveau des contraintes résiduelles induit par soudage et le diamètre du noyau de soudage dépendent directement des paramètres de soudage dont leurs effets a fait l'objet de plusieurs études sur le plan mécanique, thermique et métallurgique [1-7]. Les principaux paramètres étudiés sont le courant de soudage, le temps de soudage et la force de soudage [8-10].

II. OPTIMISATION ET ANALYSE DES EFFETS DES PARAMETRES DE SOUDAGE PAR POINTS

Afin d'assurer une bonne résistance et une intégrité des assemblages soudés par points, il est nécessaire d'optimiser les paramètres de soudage. Dans ce contexte, le présent chapitre met l'accent sur les études des effets des paramètres de soudage et la géométrie du point de soudure sur la résistance des assemblages soudés et l'application des méthodes d'optimisations appliquées aux soudages par points.

L'effet du temps de maintien sur des assemblages par points à différentes épaisseurs (Figure 1) a été étudié par Mat Din et al. [11], il a été montré que l'augmentation de l'épaisseur de la tôle nécessite un temps de maintien en encore plus important afin de donner le temps au noyau de se former car la taille de ce dernier augmente avec l'augmentation de l'épaisseur. Il a été reporté par cette étude que l'augmentation de l'épaisseur de la tôle fait augmenter la charge maximale que peut supporter l'éprouvette (Figure 2). L'épaisseur optimale des plaques assemblées est de l'ordre de 2.35 mm.

L'évolution de la limite élastique en fonction de l'épaisseur de la plaque montre que l'épaisseur optimale est de l'ordre de 2.2 mm. En conséquence, l'épaisseur optimale respectant les différents paramètres de résistance mécaniques est dans l'intervalle 2.1-2.4 mm.

CHAPITRE III : ETAT DE L'ART SUR LES EFFETS DES PARAMETRES DE SOUDAGE PAR POINT

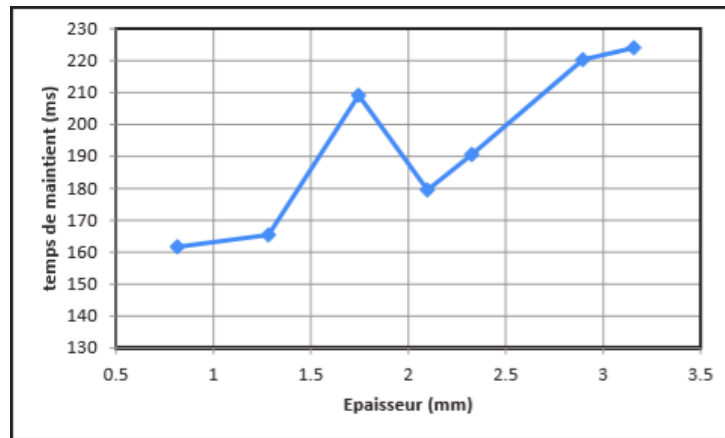


Figure III. 1. Effet du temps de maintien en fonction de l'épaisseur [11]

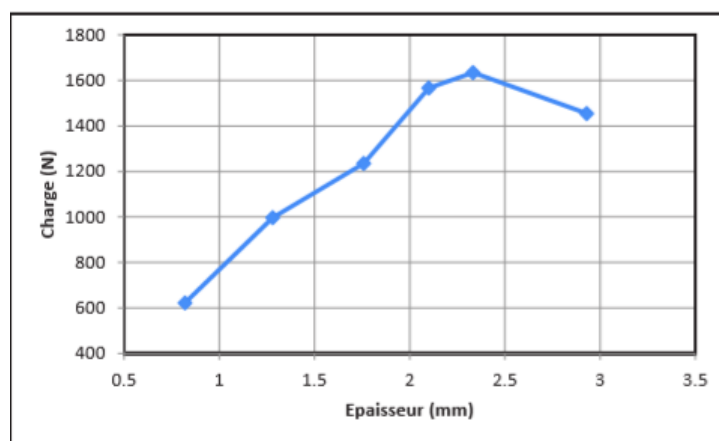


Figure III. 2. Effet de l'épaisseur de la tôle [11].

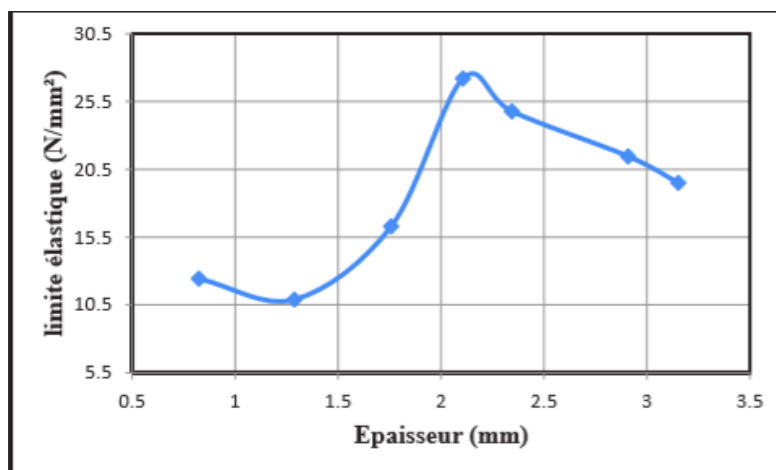
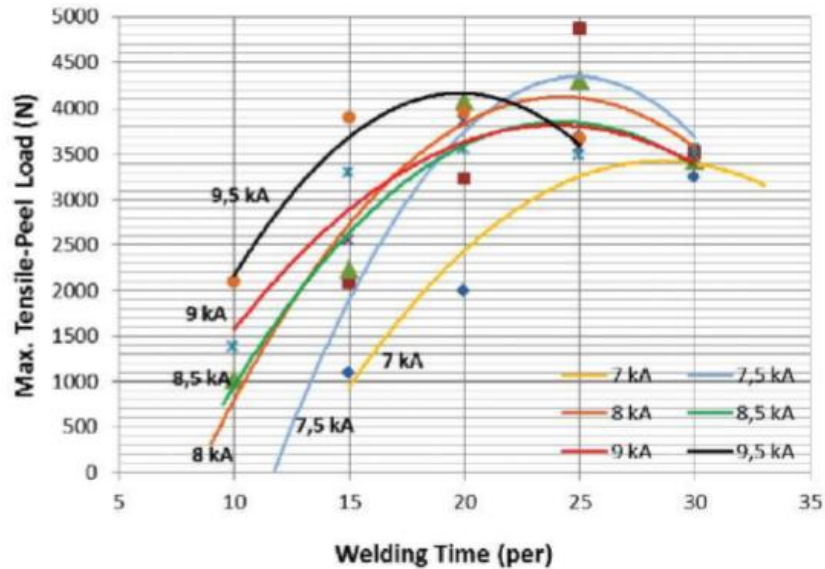


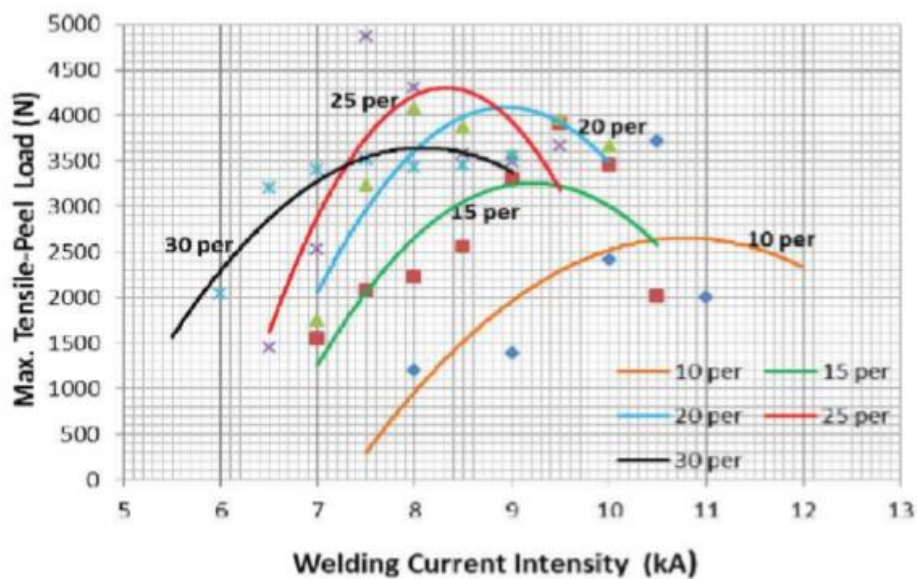
Figure III. 3. Evolution de la limite élastique pour différentes épaisseurs soudées [11]

CHAPITRE III : ETAT DE L'ART SUR LES EFFETS DES PARAMETRES DE SOUDAGE PAR POINT

L'effet combiné du temps de soudage et de l'intensité du courant de soudage sur le comportement mécanique d'un joint soudé en pelage a été investigué par Akkas [12]. Il a montré que l'augmentation du courant et du temps de soudage apporte une énergie de soudage plus importante à la zone de soudure et permet l'extension du noyau qui a pour conséquence l'augmentation de la résistance à la traction (figures 4 et 5). Le problème qui se pose quel couple « temps – courant de soudage » faut-il choisir pour avoir une résistance. Ce problème généralement réglé par optimisation multi variables et respectant un critère bien défini.



FigureIII. 4. Effet du temps de soudage sur la résistance à la traction [12]



FigureIII. 5. Effet du courant de soudage sur la résistance à la traction [12]

La qualité d'un joint de soudure est garantie par la taille du noyau de soudure, la zone affectée thermiquement et la résistance du joint soudé en optimisant les conditions de soudage. Esme

CHAPITRE III : ETAT DE L'ART SUR LES EFFETS DES PARAMETRES DE SOUDAGE PAR POINT

[13] a étudié l'optimisation des paramètres de soudage par points de l'acier SAE 1010 en appliquant la méthode de Taguchi. Il a été reporté par cette étude que l'augmentation du courant de soudage et la force de soudage sont les facteurs principaux contrôlant la résistance du joint de soudure.

Afin d'optimiser les paramètres de soudage des plaques en aciers doux pour une résistance à la rupture maximale, Raut et Achwal [14] ont utilisés la méthode de Taguchi dont la matrice orthogonal L18 de conception expérimentale a été sélectionnée. La combinaison des paramètres optimums a été déterminée en utilisant l'analyse du rapport « Signal-to-Noise » (S/N). Les résultats expérimentaux ont confirmé la validité de l'utilisation de la méthode de Taguchi pour améliorer les performances du joint de soudure et optimiser les paramètres de soudage. Afin d'éclaircir l'application de la méthode de Taguchi on présente un exemple d'étude menée par Raut et Achwal [14].

Les dimensions des plaques en acier doux sont données par le tableau 1. La configuration de l'assemblage est donnée par la figure 6. Les paramètres de soudage choisis à savoir le courant de soudage, le temps de soudage et la force de soudage sont données sur le tableau 2. La matrice expérimentale orthogonale L18 est donnée par le tableau 3 et montrant les essais à effectuer.

Tableau 1. Dimension des échantillons

Epaisseur (mm)	Largeur "W" (mm)	Longueur "L" (mm)	Longueur de recouvrement (mm)
0.8	25	150	25
1.0	25	150	25

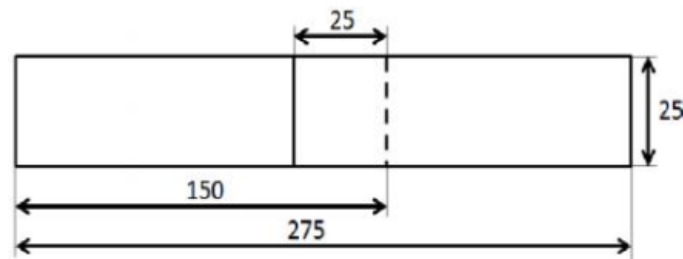


Figure III. 6. Configuration de l'assemblage en acier doux soudé par point

Tableau 2. Paramètres de soudage et les niveaux appliqués

Epaisseur (mm)	Symbole	Paramètres de soudage	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
0.8	A	Force (N)	280.5	269.2	315
	B	Courant (kA)	6.9	8.4	10.3
	C	Temps(cycle)	5	10	15
	A	Force (N)	315	334.5	345.3

CHAPITRE III : ETAT DE L'ART SUR LES EFFETS DES PARAMETRES DE SOUDAGE PAR POINT

1	B	Courant (kA)	8.4	10.3	11.8
	C	Temps (cycle)	5	10	15

Tableau 3. Matrice expérimentale orthogonale L8

Expérience	Force de soudage (N)	Courant de soudage (kA)	Temps de soudage (cycle)
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	1
5	2	2	2
6	2	3	3
7	3	1	2
8	3	2	3
9	3	3	1
10	1	1	3
11	1	2	1
12	1	3	2
13	2	1	2
14	2	2	3
15	2	3	1
16	3	1	3
17	3	2	1
18	3	3	2

Les résultats expérimentaux de la résistance au cisaillement par traction sont reportés sur le tableau 4. Les résultats montrent une influence de l'épaisseur des plaques assemblées. Les résistances de cisaillement par traction maximales respectivement pour les épaisseurs 0.8 et 1.0 mm sont de 3.4 et 3.8 KN.

Tableau 4. Résultats expérimentaux de la résistance au cisaillement par traction

Expérience	Résistance de cisaillement par traction (KN)	
	0.8 mm	1.0 mm
1	1.5	1.8
2	2.4	2.7
3	2.7	3.1
4	1.9	2.3
5	3.4	3.8
6	2.8	3.3
7	1.8	1.9
8	2.3	2.5
9	1.9	2.3
10	1.2	1.4
11	2.4	2.8
12	1.9	2.3
13	1.5	1.7
14	2.8	3.1

CHAPITRE III : ETAT DE L'ART SUR LES EFFETS DES PARAMETRES DE SOUDAGE PAR POINT

15	2.1	2.5
16	1.4	1.6
17	1.8	2.2
18	1.5	1.6

Dans ces études, Taguchi a recommandé l'utilisation de la fonction de perte pour mesurer la déviation de la qualité caractéristique à partir de la valeur désirée. Comme présenté en chapitre ci-dessus, il existe trois catégories caractéristiques de la qualité dans l'analyse du rapport S/N à savoir faible-meilleur (the lower-the better), large-meilleur (the larger- the better) et nominale-meilleur ((the more nominale - the better).

Pour l'exemple présenté, le rapport S/N est calculé sur la base de l'analyse S/N pour les différents niveaux des paramètres de soudage. Le niveau optimal des paramètres de soudage est le niveau où le rapport S/N est grand. La fonction de perte des caractéristiques de qualité large-meilleur (the larger- the better) s'exprime par l'équation suivante :

$$L_j = \left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (9)$$

$$h_j = -10 \log L_j \quad (10)$$

Où, L_j : Fonction de perte globale ; n : Nombres de tests

y_i : Valeur expérimentale de la $i^{\text{ème}}$ caractéristique de qualité ; h_j : Rapport S/N

En appliquant les équations ci-dessus, le rapport « h_j » est calculé pour chaque test et sont présenté sur le tableau 4.

Tableau 5. Rapport S/N pour les différents

Expérience	Rapport S/N (dB)	
	0.8 mm	1.0 mm
1	3.52	5.11
2	7.60	8.62
3	8.62	9.83
4	5.57	7.23
5	10.62	11.5
6	9.94	10.37
7	5.10	5.57
8	7.23	7.95
9	5.57	7.23
10	1.58	2.92
11	7.60	8.94
12	5.57	7.23
13	3.52	4.61
14	8.94	9.83
15	6.44	7.95

CHAPITRE III : ETAT DE L'ART SUR LES EFFETS DES PARAMETRES DE SOUDAGE PAR POINT

16	2.92	4.08
17	5.10	6.84
18	3.52	4.08

Dans cette étude les auteurs [4] ont cherché à quantifier l'influence de chaque niveau de paramètres en calculant la moyenne du rapport S/N. La moyenne du rapport « S/N » a été calculé pour chaque niveau et chaque effet (A, B, C) (voir Tableau 5).

La réponse du rapport S / N pour la résistance à la traction est indiquée dans le tableau 6. Après l'analyse du rapport S/N, on constate que les paramètres optimaux pour l'expérience sont ABC pour les deux feuilles de 0,8 mm et 1 mm. On note que le paramètre « Courant de soudage : B) présente la plus grande différence suivant ses niveaux tandis que chaque niveau du paramètre A (force) et C (temps) présentait moins d'effet. Les figures 7 et 8 montre respectivement l'effet des paramètres de soudage sur la réponse S/N pour des plaques soudées de 0.8 et 1.0 m.

Ainsi, les résultats expérimentaux ont montré que les paramètres de soudage sont des facteurs important pour la résistance du joint soudé. L'augmentation ou la diminution de chaque paramètre de soudage augmente ou diminue la résistance du joint soudé.

De plus l'étude a montré que le courant de soudage est un paramètre principal pour un tel assemblage. Ce résultat déjà confirmé par d'autres études [15-17].

Tableau 6. Réponse du rapport S/N pour la résistance au cisaillement par traction

Epaisseur (mm)	Symbole	Paramètres de soudage	Rapport S/N (dB)			
			Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Moyenne
0.8	A	Force (N)	5.74	7.33 (*)	4.24	5.89
	B	Courant (kA)	3.70	7.86 (*)	6.44	
	C	Temps(cycle)	5.63	5.98	6.10 (*)	
1	A	Force (N)	7.10	8.58 (*)	5.96	7.21
	B	Courant (kA)	4.91	8.94	7.78	
	C	Temps (cycle)	7.22	6.94	7.49 (*)	

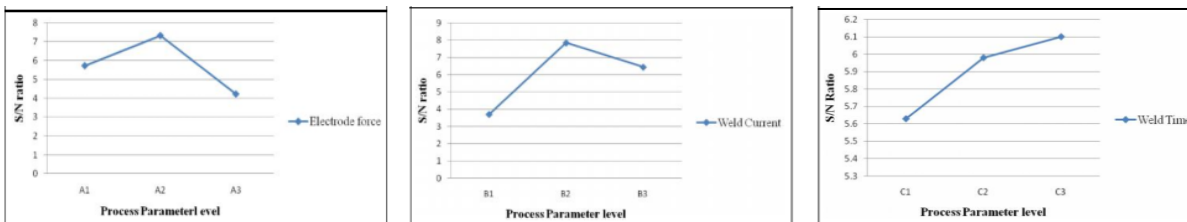


Figure III. 7. Effets des paramètres de soudage sur le rapport S/N (épaisseur = 0.8mm)

CHAPITRE III : ETAT DE L'ART SUR LES EFFETS DES PARAMETRES DE SOUDAGE PAR POINT

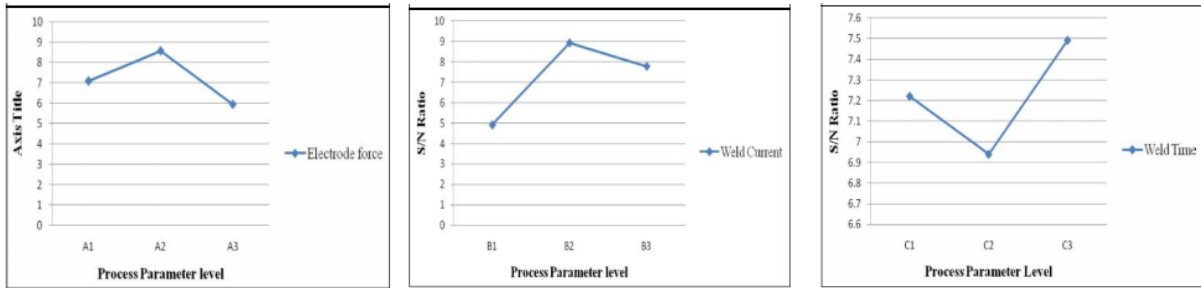


Figure III. 8. Effets des paramètres de soudage sur le rapport S/N (épaisseur = 0.8mm)

L'étude présentée par Shawon et al. [18] sur les assemblages de matériaux hétérogènes (Acier doux-Acier inoxydable) a montré que l'augmentation du courant de soudage augmente la résistance à la traction du noyau de soudage (Figure 9). Cette augmentation est la conséquence de l'augmentation du diamètre du noyau formé (Figure 10) où l'on note un effet du temps de soudage après un noyau de 5 mm. Ce phénomène a été observé par Hosein Bina et al. [19] où l'on note aussi l'augmentation de la profondeur de pénétration (voir Tableau 6).

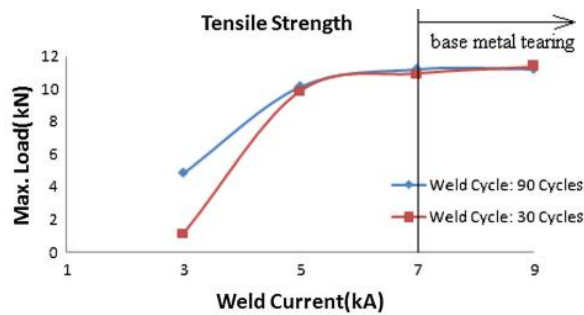


Figure 9. Effets du courant de soudage sur la résistance du joint de soudure [18]

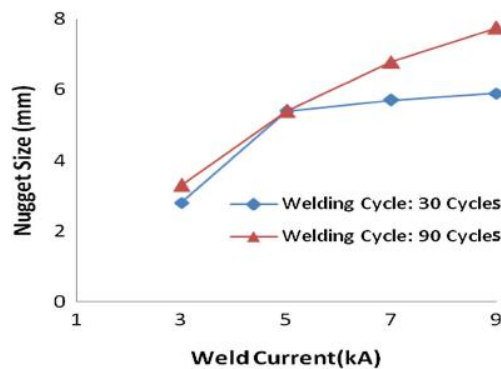


Figure III. 10. Taille du noyau du point de soudure en fonction du courant de soudage [18]

Tableau 7. Effet du courant de soudage sur le diamètre du noyau et la profondeur de pénétration de l'électrode

Courant de soudage (kA)	2.5	3.75	5
Diamètre de pépite de soudure (mm)	3.95	5.68	6.5
Profondeur de pénétration (mm)	1.93	2.18	2.43

CHAPITRE III : ETAT DE L'ART SUR LES EFFETS DES PARAMETRES DE SOUDAGE PAR POINT

Il a été reporté dans l'étude menée par Marashi et al. [20] que l'augmentation du courant de soudage pour un joint hétérogène a fait augmenter la dureté dans la zone de fusion et que le mode de rupture change en fonction du courant de soudage (Tableau 7).

Tableau 8. Effet du courant de soudage sur la dureté dans la zone de fusion et le mode de rupture

Courant de soudage	Dureté moyenne dans la zone de fusion (Hv)	Failure mode
7	208	IF
8	223	IF
9	412	PF
10	416	PF
11	423	PF
12	418	PF
13	419	PF
IF : Inter faciale	PF : Déboutonnage (Pull out)	

Il a été reporté dans l'étude menée par Jia et al. [21] que la taille du noyau de soudure et la résistance de cisaillement dépend augmente linéairement avec l'augmentation du courant de soudage et du temps de soudage (figures 10 et 11).

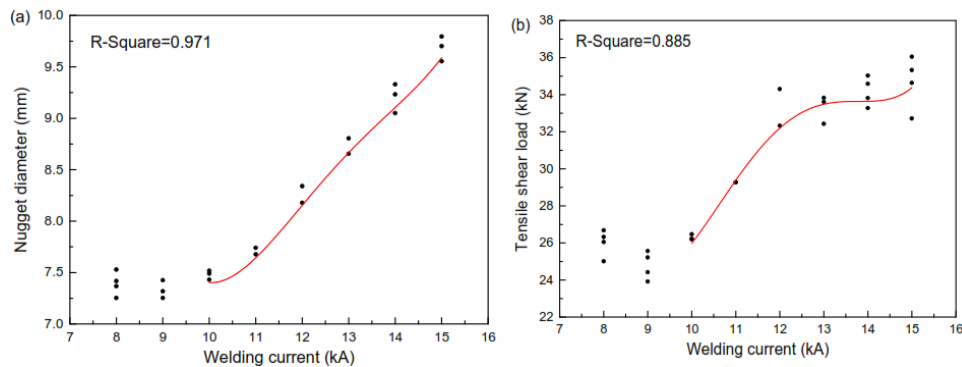


Figure III. 11. Effet du courant de soudage sur l'évolution : (a) du diamètre du noyau du point de soudure (b) de la résistance au cisaillement maximale par traction [21X]

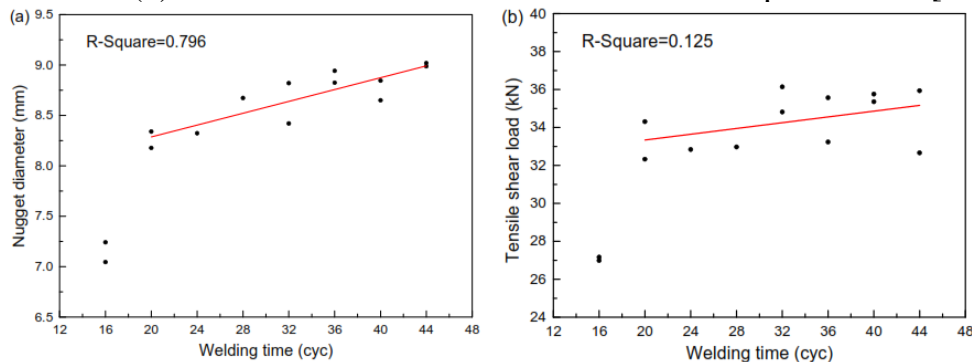


Figure III. 12. Effet du temps de soudage sur l'évolution : (a) du diamètre du noyau du point de soudure (b) de la résistance au cisaillement maximale par traction [21].

CHAPITRE III : ETAT DE L'ART SUR LES EFFETS DES PARAMETRES DE SOUDAGE PAR POINT

Thakur et al. [22] a mené une étude expérimentale dans le but d'optimiser les paramètres de soudage par point d'un acier galvanisé et par conséquent la résistance au cisaillement par traction en appliquant la méthode de Taguchi. L'étude expérimentale est conduite sous la variation des paramètres de soudages suivantes : courant de soudage, temps de soudage, Force de soudage et le diamètre de l'électrode (Tableau 8). Selon la méthode de Taguchi basée sur une conception robuste, une matrice orthogonale L27 est utilisé pour définir les essais effectués. Le tableau 9 montre la combinaison des essais effectués et les résultats de résistance de cisaillement par traction où le rapport S/N pour la résistance de cisaillement par traction en appliquant le critère d'optimisation « faible-meilleur : (the lower-the better) » est déterminé.

Tableau 9. Paramètres expérimentaux de soudage à trois niveaux [22]

Niveau	Courant de soudage (kA)	Temps de soudage (cycle)	Diamètre de l'électrode (mm)	Force de soudage (KN)
	A	B	C	D
1	8	8	4	2.0
2	10	12	6	3.5
3	12	16	8	5.0

Afin de déterminer le paramètre de soudage à effet significatif sur la résistance au cisaillement par traction, les auteurs ont appliqué l'analyse de variance « ANOVA ». La figure 10 montre le niveau d'influence de chaque paramètre. La combinaison des paramètres optimale est $A_3B_3C_2D_2$. L'analyse de variance pour la combinaison $A_2B_2C_2D_2$ a montré que le pourcentage de contribution du courant de soudage est de 68.93%, pour le temps de soudage est de 18.66%, pour la force de soudage est de 8.57% par contre l'effet du diamètre de l'électrode est négligeable (1.14%).

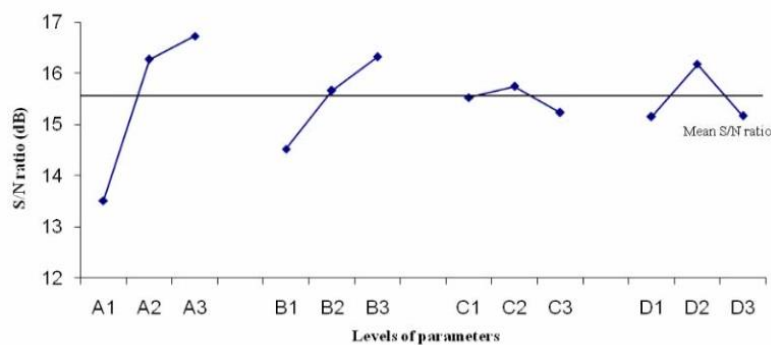


Figure III. 13. Evolution du rapport S/N relatif à la résistance à la traction en fonction des paramètres de soudage

Tableau 10. Combinaison des paramètres de soudage et les résultats expérimentaux [22]

No	Courant	Temps	Diamètre	Force	Résistance au	Rapport

CHAPITRE III : ETAT DE L'ART SUR LES EFFETS DES PARAMETRES DE SOUDAGE PAR POINT

essai	(kA)	(cycle)	Électrode (mm)	de soudage	cisaillement par traction (KN) moyenne	S/N (dB)
	A	B	C	D		
1	1	1	1	1	3.83	11.66
2	1	1	2	2	4.6	13.25
3	1	1	3	3	3.6	11.12
4	1	2	1	2	5.43	14.69
5	1	2	2	3	4.86	13.74
6	1	2	3	1	4.47	12.99
7	1	3	1	3	5.25	14.37
8	1	3	2	1	5.43	14.69
9	1	3	3	2	5.67	15.05
10	2	1	1	1	5.63	15
11	2	1	2	2	6.57	16.34
12	2	1	3	3	5.64	15.01
13	2	2	1	2	6.94	16.81
14	2	2	2	3	6.43	16.16
15	2	2	3	1	6.17	15.8
16	2	3	1	3	6.93	16.81
17	2	3	2	1	7.03	16.94
18	2	3	3	2	7.53	17.54
19	3	1	1	1	6.27	15.94
20	3	1	2	2	6.9	16.78
21	3	1	3	3	6.03	15.61
22	3	2	1	2	7.56	17.57
23	3	2	2	3	6.93	16.92
24	3	2	3	1	6.6	16.38
25	3	3	1	3	7.03	19.94
26	3	3	2	1	7.06	16.98
27	3	3	3	2	7.56	17.57

Jadhav et al. [23] ont investigué la formation de la zone soudée à travers l'évaluation du diamètre du noyau de soudure et la résistance de cisaillement maximale par traction. Les paramètres de soudage optimums sont déterminés en appliquant la méthode de Taguchi en utilisant une matrice orthogonale L9. Le niveau significatif des paramètres de soudage a été déterminé en appliquant l'analyse de variance « ANOVA ». La contribution des différents

CHAPITRE III : ETAT DE L'ART SUR LES EFFETS DES PARAMETRES DE SOUDAGE PAR POINT

paramètres de soudage contrôlant la résistance du joint (i.e. qualité du joint) est le courant de soudage de 76.20%, temps de soudage 19.79% et la force de l'électrode de 4.16%.

III. Synthèse globale

Afin d'assurer une bonne qualité d'un joint de soudure par points il est nécessaire d'optimiser les paramètres d'entrées (Courant de soudage, temps de soudage, force de soudage, diamètre de l'électrode...) afin d'assurer une bonne qualité du joint de soudure. Cette qualité est assurée par une bonne résistance au cisaillement par traction et un diamètre du noyau de soudure assurant cette résistance.

Il est reporté par l'état de l'art présenté que le courant de soudage présente un effet important pour le développement d'un bon joint de soudure. La combinaison du courant et du temps de soudage présente un effet significatif sur la résistance du joint comparativement par rapport à la force de soudage et le diamètre de l'électrode. Principalement le niveau du courant de soudage et le couple des paramètres associés définit le mode de rupture.

La méthode de Taguchi présente un outil efficace pour construire un plan expérimental réduit et optimiser les paramètres de soudage. L'analyse ANOVA un outil mathématique supplémentaire pour déterminer la contribution de chaque paramètre de soudage. Il a été reporté le temps de calcul des paramètres optimales dépend de la taille de la matrice de Taguchi et les niveaux des paramètres de soudage

CHAPITRE III : ETAT DE L'ART SUR LES EFFETS DES PARAMETRES DE SOUDAGE PAR POINT

REFERENCES

- [1] Dancette S, Fabregue D., Merlin J., Massardier-Jourdan V. Bouzekri M. (2007). "Welding of advanced high strength steels: Study of the microstructures obtained and damage mechanism during cross tension test". Internal report 2007 7737 AUP.
- [2] Sun S., Stephens E.V., Khaleel M.A. (2007). "Effect of fusion zone size and failure mode on peak load and energy absorption of advanced high strength steel spot weld. *Welding Journal*, vol. 88, pp 18-25.
- [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] Ali Tavassolizadeh, Pirooz Marashi, Majid Pouranvari (2011). "Mechanical performance of three thickness resistance spot welded low carbon steel". *Materials Science and Technology*, 27(1), pp 219-224.
- [6] Zuraidah Salleh, Yakub Md Taib, Nik Rozlin Nik Mohd Masdek, Farizah Adliza Ghazali (2019). "Improvement of mechanical properties in treated spot welded joint". *Materials Today's: Proceedings*. Volume 16, Part 4, pp 1988-1993.
- [7] Xinge Zhang, Fubin Yao, Zhenan Ren, Haiyan Yu (2018). "Effect of welding current on weld formation, microstructure, and mechanical properties in resistance spot welding of CR590T/340Y galvanized dual phase steel". *Materials (Basel)*. 11(11): 2310.
- [8] Nagsen D. Jadhav, Rahul A. Patil, Rajshekhar R. Patil (2015). "Parametric Optimization of Spot Welding metal by Taguchi Approach". *International Journal of Engineering Development and Research*. Vol. 3, Issue 4, pp 857-860.
- [9] Hessamddin Moshayedi, Iradj Sattari-Far (2014). "Resistance spot welding and the effects of welding time and current on residuals stresses". *Journal of Materials Processing Technology*. 214, pp 2545-2552.
- [10] M. Alizadeh-Sh, S.P.H. Marashi, M. Pouranvari (2014). « Resistance spot welding of AISI 430 ferritic stainless steel: Phase transformations and mechanical properties". *Materials and Design*, 56, pp 258-263.
- [11] N. A. Mat Din, H Zuhailawati, A. S. Anasyida (2016). "Resistance spot welding of AA 5052 sheet metal of dissimilar thickness". *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 114.
- [12] N. Akkas (2017). "Effect of welding current and time on tensile-peel loading in resistance spot welding". *Acta Physica Polonica Series A*, 132(3), pp 549-552.
- [13] Ugur Esme. (2009). "Application of Taguchi method for the optimization of resistance spot welding process". *The Arabian Journal for Science and Engineering*. 34(28), pp 519-528.
- [14] Manoj Raut, Vishal Achwal (2014). "Optimization of spot welding process parameters for maximum tensile strength". *Int. J. Mech. Eng. & Rob. Res.*, Vol. 3, No. 4, pp 506-517.

CHAPITRE III : ETAT DE L'ART SUR LES EFFETS DES PARAMETRES DE SOUDAGE PAR POINT

- [15] Farizah Adliza Ghazali, Yupiter H.P. Manurung, Mohamed Ackiel, Mohamed, Siti Khadijah Alias, Shahrum Abdullah (2015). "Effect of process parameters on the mechanical properties and failure behavior of spot welded low carbon steel". *Journal of Mechanical Engineering and Sciences (JMES)*. Vol. 8, pp. 1489-1497.
- [16] D. Kianersi, A. Mostafaei, J. Mohammadi (2014). "Effect of welding current and time on the microstructure, mechanical characterizations, and fracture studies of resistance spot welding joints of aisi 316l austenitic stainless steel". *Metallurgical and Materials Transactions A*. Vol. 45A, pp 4423-4442.
- [17] Manjunath R. Rawal, Vaibhav Varane, Rakesh R. Kolhapure (2019). "Process parameter optimization for resistance spot welding using response surface methdology". *International Journal of Trend in Scientific Research and Development (IJTSRD)*. Vol. 3, Issue 3, pp 1078-1082.
- [18] M.R.A. Shawon, F. Gulshan, A.S.W. Kurny (2015). "Effect of welding current on the structure and properties of resistance spot welded dissimilar (austenitic stainless steel and low carbon steel) metal joints". *J. Inst. Eng. India Ser. D*, 96(1), pp 29-36.
- [19] M. Hosein Bina, M. Jamali, M. Shamanian, H. Sabet (2014). "Investigation on the resistance spot-welded austenitic/ferritic stainless steel". *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 75, pp 1371-1379
- [20] Marashi P., Pouranvari M., Amirabdollahian S., Abedi A., Goodarzi, M. (2008). *Materials Science and Engineering A*, 480, pp 175–180.
- [21] Qiang Jia, Lei Liund, Y. Norman Zhou, Wei Guo, Yun Peng, Guisheng Zou, Zhiling Tian (2018). « Microstructure and tensile-shear properties of resistance spot-welded medium Mn Steel". *Metals* 2018, 8, 48.
- [22] A. G. Thakur, T. E. Rao, M. S. Mukhedkar, V. M. Nandedkar (2010). "Application of taguchi method for resistance spot welding of galvanized steel". *ARPJN Journal of Engineering and Applied Sciences*, VOL. 5, No 11, pp 22-26.
- [23] Nagsen D. Jadhav, Rahul A. Patil, Rajshekhar R. Patil (2015). "Parametric optimization of spot welding metal by Taguchi approach". *International Journal of Engineering Development and Research*, Volume 3, Issue 4, pp 857-860

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce travail est de déterminer les paramètres de soudage optimaux afin de maximiser la résistance à la rupture de l'acier doux qui a été soudé par points. La première partie regroupe la description du procédé de soudage par résistance par point. La deuxième partie décrit la méthode de Taguchi et les analyses de variance. La dernière partie regroupe l'état de l'art sur les effets de paramètres de soudage par point.

Elle fait ressortir les points suivants

- La taille du noyau augmente avec l'augmentation de l'épaisseur.
- L'augmentation de l'épaisseur de la tôle fait augmenter la charge maximale que peut supporter l'éprouvette.
- L'augmentation du courant et du temps de soudage apporte une énergie de soudage plus importante à la zone de soudure.
- L'augmentation ou la diminution de chaque paramètre de soudage augmente ou diminue la résistance du joint soudé.
- L'augmentation du courant de soudage augmente la résistance à la traction du noyau de soudage.
- L'augmentation du courant de soudage pour un joint hétérogène a fait augmenter la dureté dans la zone de fusion et que le mode de rupture change en fonction du courant de soudage.
- La taille du noyau de soudure et la résistance de cisaillement augmente linéairement avec l'augmentation du courant de soudage et du temps de soudage.

Le point suivant peut faire l'objet d'étude future :

- La simulation numérique du procédé de soudage par points.