

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR**

**ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA**

**FACULTE DE TECHNOLOGIE**

**DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE**

**MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER**

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Fabrication mécanique et productique

Par :

**BOUZIT Líticia**

**AINI Aicha**

**Thème**

---

**Modélisation et optimisation du procédé de soudage par friction-  
malaxage d'un alliage d'aluminium AA 3004-H32**

---

Soutenu le 06/07/2022 devant le jury composé de:

Mr. BELAAMRI Abdelatif

Président

Mr. SAHALI Mohand Akli

Rapporteur

M<sup>elle</sup> HIMED Lynda

Examinatrice

**Année Universitaire 2021-2022**

# *Remerciements*

*Avant tout, nous remercions dieu le tout puissant de nous voire donner la santé, la patience, la force et le courage tout au long de la préparation de ce mémoire de master.*

*Nous exprimons toutes nos gratitudees et reconnaissances à notre encadreur MR.SAHALI qui nous a guidés durent ce travail.*

*Sans oubliés de remercier les guéries et tous les fonctionnaires du département génie mécanique et du hall technologie.*

*Nos plus vifs remerciements s'adressent à tous la famille AINI et la famille BOUZIT*

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail et ma profonde gratitude :*

*A mes très chers parent qui m'ont encouragé, qui m'ont soutenu que dieu les gardes et les protèges.*

*A mes adorable sœur : Nihad, Anaïs*

*A Mon chère frère : Mohand Rayan*

*A ma belle-famille notamment mon mari*

*A men ange fils : Yasser A MIR*

*A mes très chères amies*

*A mes chers enseignants sans exception a toutes les personnes que j'aime.*



*- Aini aicha -*

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à toute ma famille,*

*Ma mère et mon père en premier lieu pour leurs soutiens durant toutes mes années d'étude*

*À mon petit frère Adem,*

*À mes grands-parents paternelle et maternelle qui nous ont transmis la science de l'expérience venue d'un vécu si intense,*

*À mes très chères amies.*

*À toutes les personnes que j'aime.*



*Bouzít- Lítícia -*

# *Sommaire*

# Sommaire

---

## Remerciements

## Dédicace

## Dédicace

## Sommaire

Les d'abréviation

Les acronymes

Liste des tableaux

Liste des figures

**Introduction Générale..... 1**

### *Chapitre I*

#### *Généralités sur le soudage*

Introduction .....	4
I.1. Définition de l'Assemblage .....	4
I.2. Les types d'assemblage.....	5
I.3. Définition assemblage par soudage.....	7
I.4. Les procède de soudage .....	7
Conclusion.....	14

### *Chapitre II*

#### *Etat de l'art sur le procédé FSW et la modélisation expérimentale*

Introduction .....	16
II.1. Procède FSW .....	16
II.2. Principes de FSW.....	16
II.3. Domain d'applications .....	23
II.4. Les avantages et les inconvénients du procédé de soudage(FSW) .....	26
II.5. Paramètres du soudage par friction malaxage.....	27
II.6. Les défauts génèrent par le malaxage .....	28
II.7. La méthode des surfaces de réponses (RSM) .....	30
II.8. Plans d'expériences.....	32
II.9. Les plans pour surfaces de réponses .....	36
II.10. Analyse de la variance (ANOVA) .....	40
II.11. Teste de fisher–Snedecor (F) .....	41
II.12. Analyse de la variance du modèle .....	41

## *Sommaire*

---

II.13. Régression linéaire multiple .....	44
Conclusion .....	46

### *Chapitre III*

#### *Modélisation expérimental du FSW*

Introduction .....	48
III.1. Procédure expérimental .....	48
III.2. Conception des outils FSW .....	49
III.3. Plan d'expérience .....	50
III.4. La puissance électrique consommée .....	52
III.5. Résistance à la rupture .....	53
III.6. Résultats et discussions .....	54
III.7. La régression linéaire et l'analyse de la variance (ANOVA) .....	54
Conclusion .....	66
<b>Conclusion Générale .....</b>	<b>67</b>
<b>Liste bibliographie .....</b>	<b>70</b>
<b>Tables des matières .....</b>	<b>75</b>

**Les d'abréviation.**

N : Fréquence de rotation (tr/min).

V : Vitesse de soudage (mm/min).

F : Forme de pion.

R<sub>r</sub> : Résistance à la rupture(MPA).

P<sub>c</sub> : Puissance électrique consommée (watt).

Y : Vecteur des réponses expérimentales.

$\bar{Y}$  : Moyenne arithmétique des réponses mesurées y.

$\hat{Y}$  : Vecteur des réponses estimées.

Y<sub>i</sub> : Valeur de la réponse expérimentale i.

x : vecteur des valeurs des facteurs.

x<sub>i</sub> : Valeur du facteur i.

X : matrice du modèle ou matrice des effets.

X<sup>t</sup>X : Matrice d'information ou matrice de Fisher.β= vecteur de coefficient théorique.

β<sup>^</sup> : Vecteur des coefficients estimés dans la modélisation.

β<sub>i</sub> : Effets moyens relatifs aux facteurs x<sub>i</sub>.

β<sub>ij</sub> : Effets moyens relatifs aux facteurs x<sub>i</sub> et x<sub>j</sub> .

δ : Ecart type.

ε : Vecteur des erreurs de modélisation.

σ<sup>2</sup> : Variance expérimentale.

n : Nombre d'expérience

p : Nombre de coefficients du modèle postulé.

CM<sub>a</sub> : Carré moyenne factorielle.

CM<sub>r</sub> : Carré moyenne résiduelle.

Dt : (Dwell-time) temps préchauffage.

**Les acronymes**

**ANOVA** : analyse la variance.

**FSW**: (friction stir welding) soudage par friction malaxage.

**MSR** : méthode des surfaces des réponses.

**Liste des tableaux**

<i>Tableau I-1: Les avantages et inconvénients de TIG .....</i>	9
<i>Tableau I-2: Les inconvénients et les avantages soudage SMAW .....</i>	10
<i>Tableau I-3: Les avantages et incohésions de SMAW [8]. .....</i>	11
<i>Tableau I-4: Les avantages et inconvénients de SAW [11]. .....</i>	12
<i>Tableau II-1: Plans de Box-Behnken pour trois facteurs [30].....</i>	38
<i>Tableau II-2: Plan de Box- Behnken pour 3 facteurs [30].....</i>	39
<i>Tableau III-1: Composition chimique d'AA6061 .....</i>	49
<i>Tableau III-2: Descriptions des outils.....</i>	50
<i>Tableau III-3: Plan d'expérience Box-Behnken codé et la puissance du moteur électrique, la résistance à la rupture.....</i>	51
<i>Tableau III-4: niveaux des facteurs utilisés dans le plan d'expérience .....</i>	52
<i>Tableau III-5: Régression linéaire multiple (puissance consommé).....</i>	55
<i>Tableau III-6: Régression linéaire (résistance de la rupture) .....</i>	60

## Liste des figures

---

### Liste des figures

<i>Figure I-1 : Différentes techniques d'assemblage par déformation plastique: (a) rivetage auto poinçonneur (coupe), (b) rivetage, (c) clichage à point rond, (d) clichage à point carré. ....</i>	<i>4</i>
<i>Figure I-2 : Principe d'une soudure .....</i>	<i>7</i>
<i>Figure I-3 : Circuit de soudage à l'arc .....</i>	<i>8</i>
<i>Figure I-4 : Soudage TIG (Tungstène Inerte Gaz) .....</i>	<i>8</i>
<i>Figure I-5 : Soudage à l'arc avec électrodes enrobées SMAW (schéma de principe) [8].</i>	<i>10</i>
<i>Figure I-6 : Schéma de soudage sous flux .....</i>	<i>12</i>
<i>Figure I-7 : Classification des procédés de soudage par friction .....</i>	<i>13</i>
<i>Figure II-1 : Principe de procédé par friction et malaxage .....</i>	<i>17</i>
<i>Figure II-2 : Description des phases de FSW .....</i>	<i>18</i>
<i>Figure II-3 : Présentation du soudage par friction malaxage. A-Soudure rectiligne de deux plaques mises bout about. B-Visualisation du plan de joint lors de la phase de soudure. ....</i>	<i>20</i>
<i>Figure II-4 : Présentation de la phase de pénétration .....</i>	<i>21</i>
<i>Figure II-5 : Présentation de la phase de soudage .....</i>	<i>21</i>
<i>Figure II-6 : Présentation de la phase de retrait de l'outil .....</i>	<i>22</i>
<i>Figure II-7 : Illustration du procédé (FSSW).....</i>	<i>22</i>
<i>Figure II-8 : Panneaux préfabriqués (Hydro Marine Aluminium) destinés au pont du bateau de croisière "The World" .....</i>	<i>23</i>
<i>Figure II-9 : Bateau de croisière "The World" dont le pont est soudé par FSW.....</i>	<i>23</i>
<i>Figure II-10 : Voilure d'avion soudée par FSW.....</i>	<i>24</i>

## *Liste des figures*

---

<i>Figure II-11 : Soudage de profilé du train Hitachi</i> .....	25
<i>Figure II-12 : Visualisation des paramètres de soudage</i> .....	28
<i>Figure II-13 : Défaut de surface « flash »</i> .....	29
<i>Figure II-14 : Défaut de surface « brûlure »</i> .....	30
<i>Figure II-15 : Bavures excessives le long du joint (« Dibbon flash »)</i> .....	30
<i>Figure II-16 : Domaine de variation du facteur</i> .....	32
<i>Figure II-17 : La surface de réponse</i> .....	34
<i>Figure II-18 : Plan de Doehlert</i> .....	38
<i>Figure II-19 : Plan de Box- Behnken pour trois facteurs</i> .....	39
<i>Figure III-1 : Fraiseuse universelle modifiée de type FH 1.6 ALMO</i> .....	48
<i>Figure III-2 : Plaques fixées par brides étagées pour un soudage FSW bout à bout</i> .....	49
<i>Figure III-3 : Les outils de soudage de FSW utilisés</i> .....	50
<i>Figure III-4 : Exécution de l'opération de soudage par friction et malaxage</i> .....	51
<i>Figure III-5 : Pince multimètre LUNI-T</i> .....	52
<i>Figure III-6 : Plaques soudées bout à bout (a). Eprouvette de traction (b)</i> .....	53
<i>Figure III-7 : Machine de traction PHYWE d'éprouvettes plates</i> .....	54
<i>Figure III-8 : Effet moyen de la fréquence de rotation sur la puissance électrique consommée</i> .....	55
<i>Figure III-9 : Effet moyen de la vitesse de soudage sur la puissance électrique consommée</i> .....	56
<i>Figure III-10 : Effet moyen de la forme du pion sur la puissance électrique consommée</i> .....	56
<i>Figure III-11 : Surface de réponse de la puissance électrique consommée en fonction de F et N</i> .....	57

## *Liste des figures*

---

<i>Figure III-12 : Surface de réponse de la puissance électrique consommée en fonction de V et N.....</i>	<i>58</i>
<i>Figure III-13 : Surface de réponse de la puissance électrique consommée en fonction de V et F.....</i>	<i>59</i>
<i>Figure III-14 : Effet moyen de la fréquence de rotation sur la résistance a la rupture.....</i>	<i>61</i>
<i>Figure III-15 : Effet moyen de la vitesse de soudage sur la vitesse de rotation.....</i>	<i>61</i>
<i>Figure III-16 : Effet moyen de la forme du pion sur la résistance à la rupture.....</i>	<i>62</i>
<i>Figure III-17 : Surface de réponse de la résistance a rupture en fonction de F et.....</i>	<i>63</i>
<i>Figure III-18 : Surface de réponse de la puissance électrique consommée en fonction de V et N.....</i>	<i>64</i>
<i>Figure III-19 : Surface de réponse de la résistance a la rupture en fonction de V et F. ...</i>	<i>65</i>

# *Introducción General*

## *Introduction Générale*

---

Le soudage par friction malaxage (*friction stir Welding* abrégé FSW) est un nouveau procédé d'assemblage mis au point par la société *The Welding Institute*. Le procédé de soudage par friction et malaxage (FSW, Friction Stir Welding) est un procédé de soudage à l'état solide sans métal d'apport, inventé en 1991, qui est présent dans différents domaines industriels notamment l'industrie aéronautique, la construction navales, le transport ferroviaires et automobiles. Le FSW est conçue pour le soudage des matériaux difficilement soudables par les procédés de soudage par fusion conventionnels notamment les alliages d'aluminium, le cuivre et ses alliages.

L'originalité de ce procédé consiste à souder les pièces à l'état solide, ce qui permet de supprimer les défauts liés à la solidification et conduit à des contraintes internes faibles par rapport au soudage classique. Il devient alors possible d'assembler des Alliages généralement considérés comme difficilement soudables tels que ceux mentionnés précédemment. Ce procédé possède un potentiel industriel important car il permet de créer des structures légères à un coût de production inférieur à celui des technologies traditionnelles. Les principaux avantages de ce procédé sont :

- La robustesse opératoire,
- L'absence de fil d'apport et de préparation des bords avant soudage
- Une grande résistance des joints soudés,
- Un faible niveau de contraintes résiduelles
- La neutralité environnementale.

Il présente des nombreux avantages particulièrement le soudage à bas point de fusion en évitant des défauts correspondant à des fissures à chaud, à des porosités et à des soufflures. Son principe consiste à chauffer et à malaxer la matière dans la zone à souder, à l'aide des outils dont les formes (cylindrique, conique, filetés) comportant des épaulements et des pions.

La mise en œuvre du procédé du soudage par friction a traité l'influence de la fréquence de rotation, la vitesse de soudage et l'effort de plongé sur les caractéristiques mécaniques du cordon de soudure basé sur des essais de traction. En outre, La modélisation

## *Introduction Générale*

---

expérimentale de soudage par friction et malaxage fait l'objet de nombreuses études, elle est devenue un besoin pour mieux identifier les paramètres de soudage optimaux.

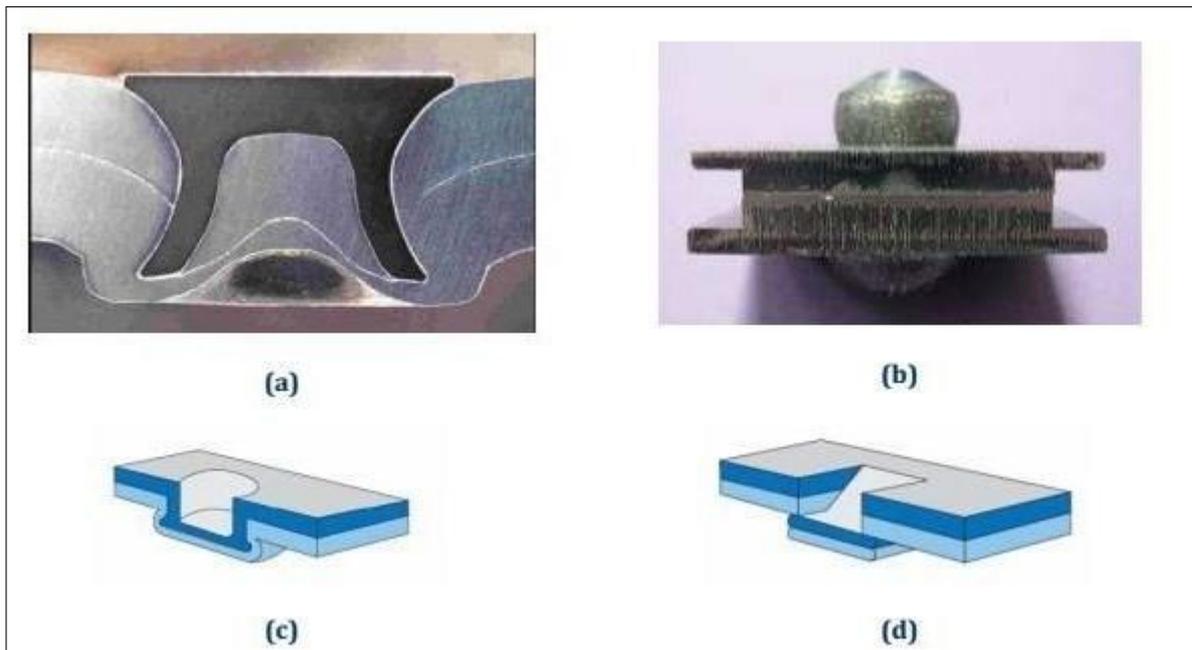
*Chapitre I*  
*Généralités sur le*  
*soudage*

## Introduction

De nombreuses industries réalisent des assemblages d'éléments métalliques par soudage (menuiserie métallique, constructions navale, offshore, ferroviaire et automobile, ...). Il existe aujourd'hui de nombreux procédés de soudage répondant à la très grande variété d'assemblage à réaliser et aux caractéristiques des métaux utilisés. Ce chapitre fait une description des différentes sources d'énergie utilisées en soudage.

### I.1. Définition de l'Assemblage

Les méthodes d'assemblage par déformation plastique regroupent les méthodes d'assemblage à froid, de produits minces dont la tenue mécanique est assurée par la déformation et l'interpénétration des composants de l'assemblage. Ces assemblages peuvent être créés sans apport de matière clinchage (Figure I-1 c et d) ou avec apport d'un composant supplémentaire rivetage (Figure I-1 a), rivetage auto-poinçonneur (Figure I-1 b). [1]



**Figure I-1** : Différentes techniques d'assemblage par déformation plastique: (a) rivetage auto poinçonneur (coupe), (b) rivetage, (c) clinchage à point rond, (d) clinchage à point carré.

## **I.2. Les types d'assemblage**

On distingue ensuite différents types d'assemblage, un assemblage peut être permanent ou démontable direct ou indirect.

### **I.2.1. Assemblage permanent**

Assemblage non démontable Pour supprimer cette liaison, il est nécessaire de déformer ou de détruire au moins une des pièces assemblées.

- soudure
- clinchage
- scellement
- certains frettages

### **I.2.2. Assemblage démontable**

La liaison est conçue de manière à être démontée sans détérioration importante des pièces qui peuvent être généralement réutilisées pour recréer un assemblage. L'élément assurant la liaison peut ne pas être réutilisable.

- clou, démontage par destruction du clou.
- vis
- rivet, démontage par destruction du rivet.
- brasure, perte de la brasure au démontage
- agrafe, démontage par destruction de l'agrafe.
- goupille
- clavette
- certains frettages
- certaines colles et adhésifs

**I.2.3. Assemblage direct**

L'assemblage ne nécessite aucune pièce intermédiaire, la forme des pièces en contact

- Frettage
- Soudage
- Clinchage
- Emboîtement élastique

**I.2.4. Assemblage indirect**

Préparation de trois éprouvettes collées. Un essai de traction-cisaillement est souvent utilisé

- Collage
- Agrafage
- Anneau élastique
- Bague de tolérance
- Clavette
- Clou
- Embrèvement (avec tenon, mortaise et cheville)
- Goupille
- Rivet
- Scellement
- Visserie : vis, écrou, boulon, goujon, filetage, taraudage.

Lors de la création d'un assemblage avec un logiciel de CAO, il est possible d'importer différentes pièces préalablement conçues pour lier et donc d'essayer des liaisons

de nature différente.

### I.3. Définition assemblage par soudage

Le soudage permet, par définition de joindre, réunir ou faire adhérer des pièces d'une matière solide par fusion de parties en contact ou par l'intermédiaire d'une composition afin d'assurer une continuité de la matière [2]. Les méthodes de soudage sont nombreuses et choisies en fonction de l'usage prévu, de la matière à souder, de la forme des pièces à souder. Le soudage s'impose pour diverses raisons : dimensionnelles (un pont), structurelles (un réservoir), constructive (une carrosserie), de poids (un panneau), économique (un plancher) ou d'autres. Il peut entrer en compétition avec d'autres modes d'assemblage tels

le visage, le sertissage, le rivetage, le collage, l'agrafage. L'assemblage par soudage occupe une place importante dans l'univers de la construction des bateaux, des trains, des avions, des fusées, de l'automobile, des ponts, tuyaux, des réservoirs et tant d'autres structures qui ne sauraient être construites sans le recours au soudage. De nombreux aciers d'usage général, et notamment des tôles et profilés, sont mis en œuvre par soudage.

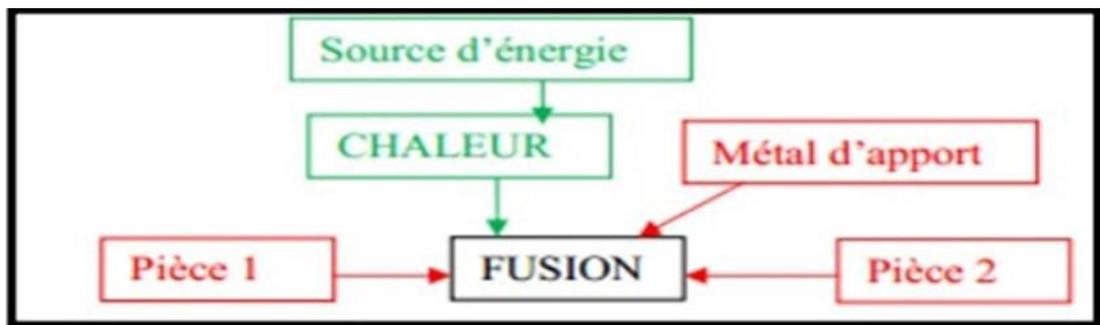


Figure I-2 : Principe d'une soudure [3].

### I.4. Les procédés de soudage

La plupart des procédés de soudage sont utilisables pour assembler des pièces métalliques. Ce procédé regroupe les types de soudage qui utilisent l'arc électrique comme source de fusion sont :

- Le soudage avec électrode enrobées.
- Le soudage avec électrode réfractaire TIG
- Le soudage semi-automatique sous protection gazeuse : MIG ou MAG.

- Le soudage sous flux en poudre (procédé SAW).

#### I.4.1. Soudage à l'arc

Le terme (soudage à l'arc) définit un procédé de soudage par fusion des bords et addition d'un métal d'apport (souvent contenu dans l'électrode ou le fil-électrode). La chaleur de l'arc peut varier entre 3500 et 5550 °C. Le métal de base est fondu avec le métal d'apport, ce qui crée le bain de fusion [4]. Lors du soudage à l'arc, le courant circule à travers un conducteur qui relie le poste de soudage à l'électrode. Il forme un arc électrique en traversant l'espace libre entre l'électrode et le métal de base, puis il poursuit sa course en passant par le câble de masse pour retourner au poste de soudage.

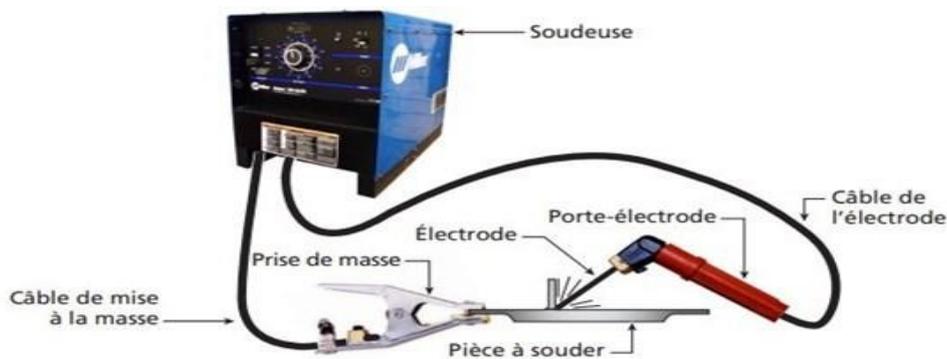


Figure I-3 : Circuit de soudage à l'arc [5].

##### a. Soudage à l'arc TIG

Le soudage TIG est un procédé de soudage sous flux gazeux avec électrode réfractaire sous une alimentation en courant continu pour les métaux et alliages (aciers, inox, cuivre ...) et un courant alternatif pour les alliages légers d'aluminium ou du magnésium (procédé 141 selon l'ISO 4063) [6]. Le terme (TIG) est l'abréviation de (tungstène Inerte Gas) et sert à désigner le procédé de soudage en atmosphère inerte avec électrode de tungstène.

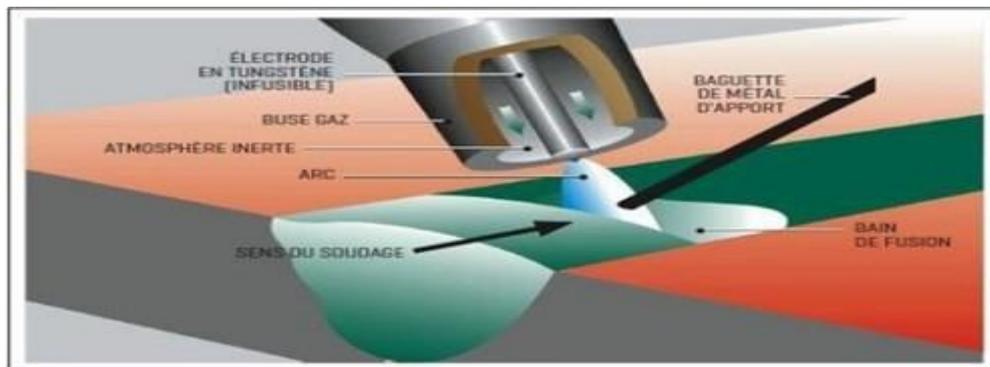


Figure I-4 : Soudage TIG (Tungstène Inerte Gaz) [7].

❖ Les inconvénients et les avantages sont synthétisés dans le tableau suivant :

**Tableau I-1: Les avantages et inconvénients de TIG**

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>-Selon l'application finale le procédé TIG peut être pratiqué avec ou sans métal d'apport.</li> <li>- Lors de la soudure avec un procédé TIG, On ne constate ni fumée ni résidu.</li> <li>Tous les métaux peuvent être assemblés avec le procédé TIG.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- En comparaison avec un soudage manuel, le coût des équipements est supérieur avec un procédé TIG orbital.</li> <li>- Toujours en comparaison avec les procédés MIG/MAG</li> <li>- Le procédé TIG est déconseillé avec les environnements poussiéreux et enfumés</li> </ul>

**b. Soudage à l'arc SMAW**

Le soudage à l'électrode enrobée (shielded metal arc Welding «SMAW») est l'un des plus simples procédés de soudage à l'arc. L'appareillage comporte une source de courant continu ou alternatif, une pince porte électrode, un câble de liaison et un câble de masse. Ce dernier se présente après solidification recouvert de laitier provenant de l'enrobage fondu que l'on élimine ultérieurement [8]. Il a pour but de faciliter l'amorçage de l'arc, protéger le métal et le cordon contre toute réaction avec l'air, ainsi que stabiliser et guider l'arc grâce à un retard à la fusion

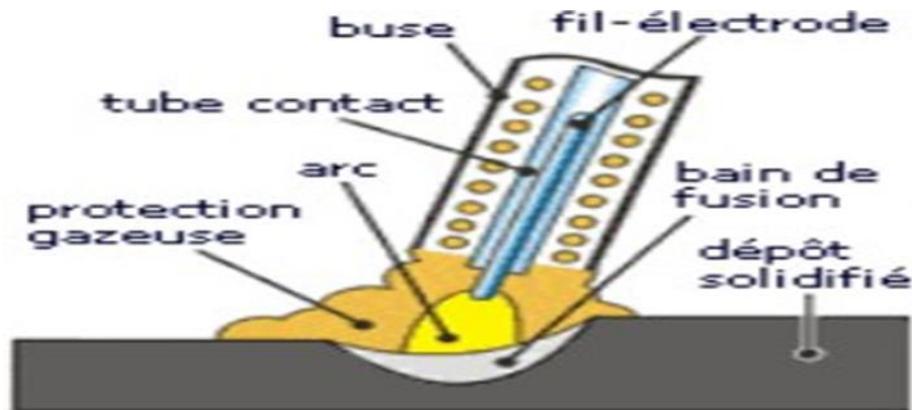
❖ Les inconvénients et les avantages sont synthétisés dans le tableau suivant :

**Tableau I-2: Les inconvénients et les avantages soudage SMAW**

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Encombrement du poste à souder réduit : avantage sur chantier [9].</li> <li>- Le soudage SMAW s'exécute dans toutes les positions, permet une grande autonomie et l'équipement requis est peu dispendieux [10].</li> <li>- Le SMAW peut atteindre une bonne pénétration.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Le coefficient de transmission thermique du procédé (c'est-à-dire la quantité de chaleur transmise à la pièce) varie entre 50 et 85 %. Comme la profondeur de pénétration de la soudure augmente en fonction de ce coefficient, le SMAW peut atteindre une bonne pénétration.</li> </ul> <p>Cependant, la chaleur au centre de l'arc est plus intense et cela peut causer une déformation angulaire [10].</p>

**c. Soudage à l'arc MIG/MAG**

Le soudage est un procédé d'assemblage consistant à lier des pièces en effectuant une fusion locale de celles-ci. Cela permet d'assurer, après refroidissement, une continuité physique entre les deux pièces. Simplifiant les assemblages, cette technique offre les meilleures garanties de résistance mécanique, d'étanchéité et de continuités thermique, électrique et magnétique. Plusieurs matériaux peuvent être soudés, mais le principal domaine d'application du soudage est l'assemblage des métaux.



**Figure I-5 : Soudage à l'arc avec électrodes enrobées SMAW (schéma de principe) [8].**

Tableau I-3: Les avantages et incohésions de SMAW [8].

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Forte productivité.</li> <li>- Grande vitesse de soudage (gain de temps).</li> <li>- Taux de dépôt de métal important.</li> <li>- Limitation des déformations.</li> <li>- Nombre de reprises de soudure limité.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Entretien fréquent et minutieux.</li> <li>- Difficile à utiliser dans les endroits exigus et peu pratique pour les applications qui exigent un grand déplacement de la torche entre deux soudures.</li> <li>- Les économies de temps réalisées avec ces procédés peuvent être grandement réduites par une technique d'exécution inadéquate.</li> </ul> <p>En effet, la vitesse de soudage élevée exige des précautions additionnelles et demande au soudeur de réagir très vite. Ainsi, le fil peut demeurer figé dans le bain de fusion solidifié ou fondre dans le tube contact, ce qui entraîne une perte de temps considérable pour l'extraire avant de poursuivre le travail.</p>

#### d. Soudage à l'arc SAW

Le soudage à l'arc sous flux (ou SAW) est une méthode de soudage automatisée extrêmement efficace. ESAB offre des solutions clés en main pour le soudage SAW automatisé et les équipements auxiliaires, comme les systèmes de gestion du flux et les systèmes de suivi du joint entièrement automatisés afin de maximiser l'optimisation et la rentabilité de nos clients.

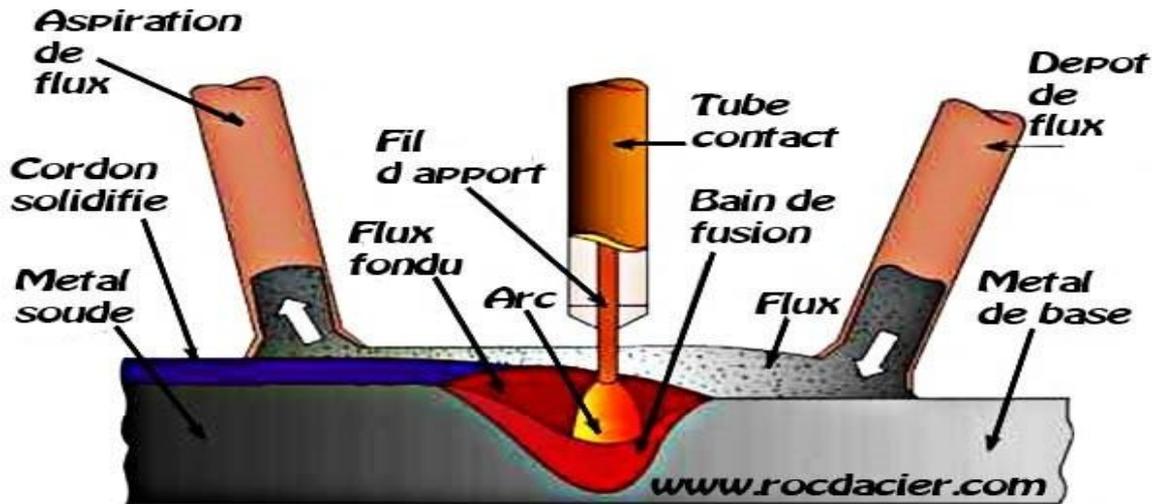


Figure I-6 : Schéma de soudage sous flux [11].

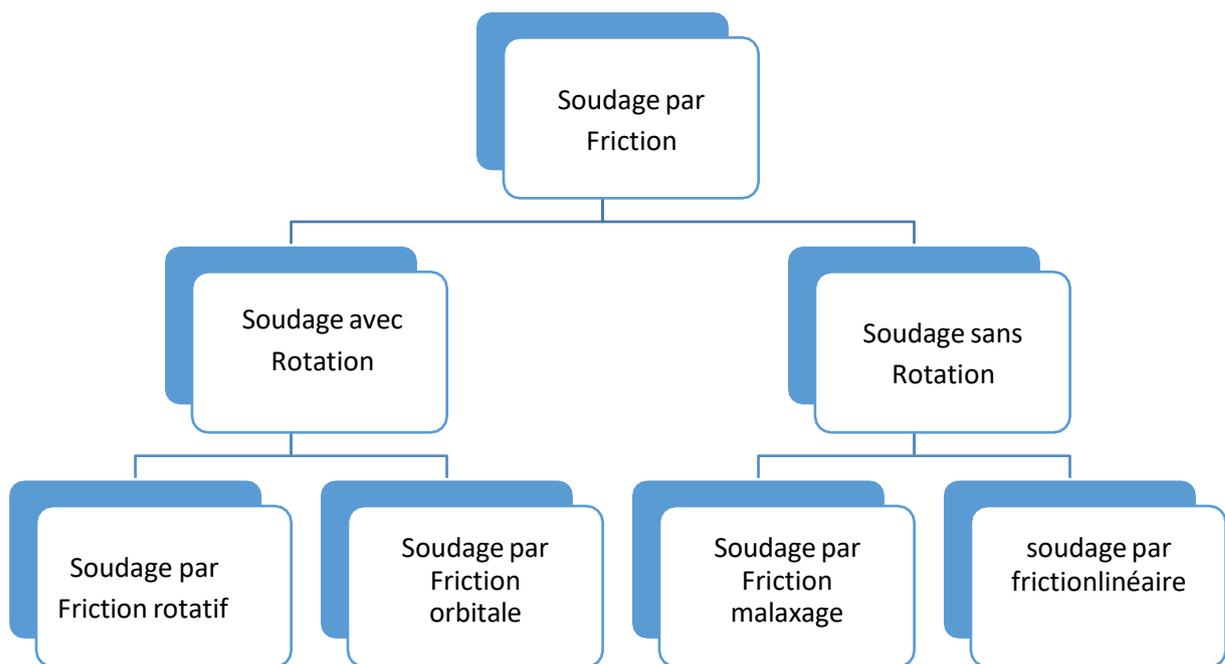
❖ Le soudage à l'arc submergé fait référence à la méthode de combustion à l'arc sous la couche de flux pour le soudage, nous présentons ici les avantages et les inconvénients de cette méthode de soudage :

Tableau I-4: Les avantages et inconvénients de SAW [11].

Avantages	Inconvénient
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Le processus facilement automatisé le rend adapté aux applications automatisées.</li> <li>- Nécessite moins de compétences de l'opérateur et une formation minimale</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La disponibilité des alliages est limitée à certains alliages couramment utilisés pour la reconstruction de l'arc submergé.</li> <li>- La position de soudage est limitée à une position plate en raison du blindage de flux, généralement limité aux pièces cylindriques.</li> <li>- Nécessite de multiples couches de dilution extrêmement élevée pour obtenir des performances d'usure maximales.</li> </ul>

#### I.4.2. Le procédé Soudage par friction

Le soudage par friction est un procédé de soudage multiple et novateur qui trouve de nombreuses applications dans différentes branches de l'industrie. Les avantages du soudage par friction sont des assemblages de haute qualité, la rapidité du procédé par rapport aux procédés de soudage conventionnels et la possibilité d'une automatisation complète du processus de telle sorte qu'une qualité constante est garantie. Aussi pour ce procédé, nous avons une machine disponible. [12]



*Figure I-7 : Classification des procédés de soudage par friction*

##### Les avantages du soudage par friction

- Assemblages de haute qualité ayant une bonne structure métallurgique comme le matériau n'est pas porté à fusion.
- Pas de préparation spéciale des pièces.
- Le procédé de soudage est beaucoup plus rapide que les procédés de soudage conventionnels.
- Peu de déformations après soudage en raison des temps de soudage courts et des faibles températures maximales.

**Conclusion**

Ce chapitre permet d'introduire les procédés de soudage, d'aborder leur classification. Il donne quelques orientations concernant le choix d'un procédé de soudage pour une application donnée. Un point relativement important lié au soudage, Les procédés de soudage sont en constante évolution que ce soit du point de vue de la technologie des procédés ou de celui des domaines d'application.

*Chapitre II Etat de  
l'art sur le procédé FSW et  
la modélisation  
expérimentale*

**Introduction**

Le soudage des métaux par friction consiste à produire un échauffement, dû à une forte pression et un frottement intense, entre deux surfaces à assembler. L'élévation de température produite par la friction entraîne un ramollissement du métal qui, par la pression, est partiellement chassé du joint en brisant et entraînant la fine couche d'oxyde présente sur les surfaces. Ce sont la haute température et l'expulsion des oxydes qui garantissent ce soudage sans fusion de métal. Les conditions requises sont similaires au soudage du fer par forgeage, déjà connu il y a 4000 ans, où le bris des oxydes entre les surfaces assure un contact intime métal-métal qui se soude, dans ce cas vers 1000°C. C'est ce même mécanisme qui assure la cohésion du métal dans le procédé de soudage par friction malaxage (Friction Stir Welding, FSW) où on utilise un outil rotatif qui produit la friction et le malaxe du métal tout en pulvérisant les films d'oxydes dans l'interface à assembler [14].

Plusieurs phénomènes physiques interviennent lors du soudage par friction et malaxage à savoir; grandes vitesses de déformation plastique, transfert de chaleur, métallurgie et mécanique de contact ...etc. Cela rend très complexe leur couplage dans le but d'étudier les performances de ce procédé. Cependant, la modélisation à l'aide de la méthode de surface de réponse et les plans d'expériences permet de contourner cette difficulté. Ce chapitre fait donc un état de l'art sur le procédé de soudage par friction-malaxage ainsi que sur la méthodologie de modélisation expérimentale.

**II.1. Procède FSW**

Soudage FSW, qui peut se traduire par « friction-malaxage » ou « soudage Thixotropique » est une technologie prometteuse pour l'assemblage des pièces d'aluminium. Puisqu'elle permet de souder des alliages d'aluminium à haute résistance, sans passer par la Fusion. Certains alliages étaient jusqu'à présent difficilement soudables par les procédés de Soudage traditionnels. Ce procédé est également utilisé et très apprécié pour l'assemblage de matériaux Dissemblables [14].

**II.2. Principes de FSW**

Les deux pièces à souder sont mises en contact et solidement bridées. Puis, l'outil Constitué principalement d'un épaulement et d'un pion (Figure II.1) pénètre dans la matière.

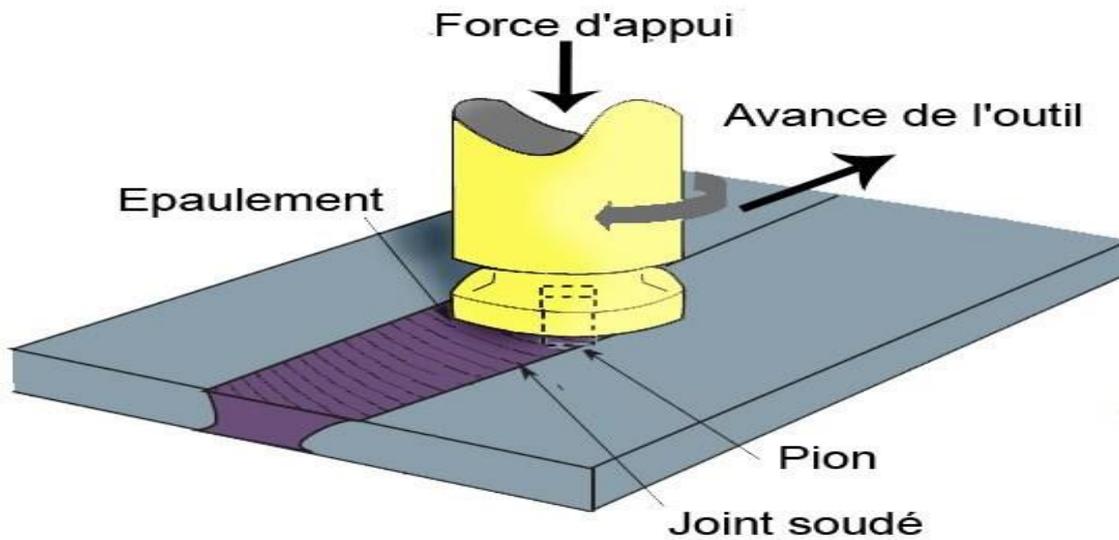


Figure II-1 : Principe de procédé par friction et malaxage [14].

➤ **Epaulement**

• **Rôle**

- Confiner la matière autour du pion
- Contribuer à l'échauffement et au malaxage de la matière
- Forgeage de la matière

➤ **Contact : Au niveau de la surface des pièces à assembler**

• **PION**

Le Rôle de pion

- Malaxer,
- Permettre une déformation plastique par rotation et par l'avance
- Extrusion de la matière

➤ **Contact : Au niveau de l'interface, pénètre dans la matière.**

Le mouvement de rotation et de translation de l'outil provoque l'échauffement du matériau. Cet échauffement n'est pas uniquement dû à la friction entre l'outil et la matière mais aussi à la déformation plastique de cette dernière. Cette montée locale de température rend en état «Pâteux » le matériau autour de l'outil et cela facilite son malaxage [15]. Le procédé de soudage FSW peut être décomposé en 4 étapes (Figure 2) :

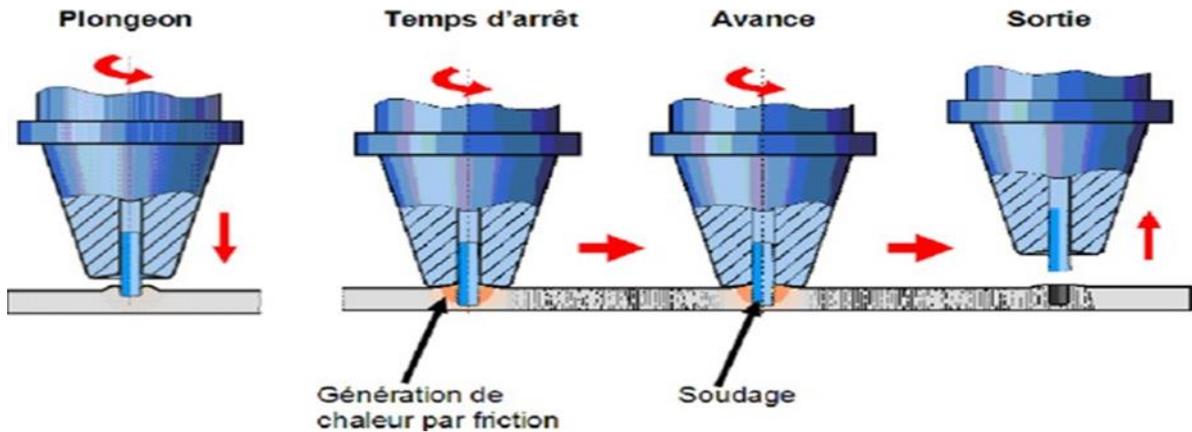


Figure II-2 : Description des phases de FSW [15].

- **Pénétration de l'outil**

L'outil composé d'un pion de géométrie plus ou moins complexe et d'un épaulement de diamètre de 2 à 3 fois supérieur au pion est mis en rotation (entre 710 et 1400 tr/min). Sous un effort défini, le pion entre en contact avec la surface des pièces à assembler. La chaleur générée par le frottement pion-matière provoque un ramollissement local de la matière et permet la pénétration du pion jusqu'à ce que l'épaulement entre en contact avec la surface des pièces [15].

- **Préchauffage**

Afin de générer l'apport de chaleur nécessaire pour obtenir un volume de matière malléable au voisinage de l'outil, celui-ci est maintenu en rotation pendant un temps appelé Dwell-time ou temps de préchauffage (Dt). Sa durée dépend des matériaux à assembler (il faut au moins atteindre la température de forgeabilité des matériaux de base), des épaisseurs et des configurations d'assemblage.

- **Soudage**

A l'issue de la phase de préchauffage, l'outil en rotation se déplace le long du joint à une vitesse définie (typiquement inférieure à 2 m/min). Par un mécanisme combiné d'extrusion par le pion et de forgeage par l'épaulement, le cordon est réalisé de proche en proche. Une nouvelle structure cristalline commune aux deux pièces est formée grâce à des phénomènes de restauration-recristallisation. La liaison métallique est ainsi assurée sans atteindre la température de fusion des matériaux de base, ce qui permet de s'affranchir de

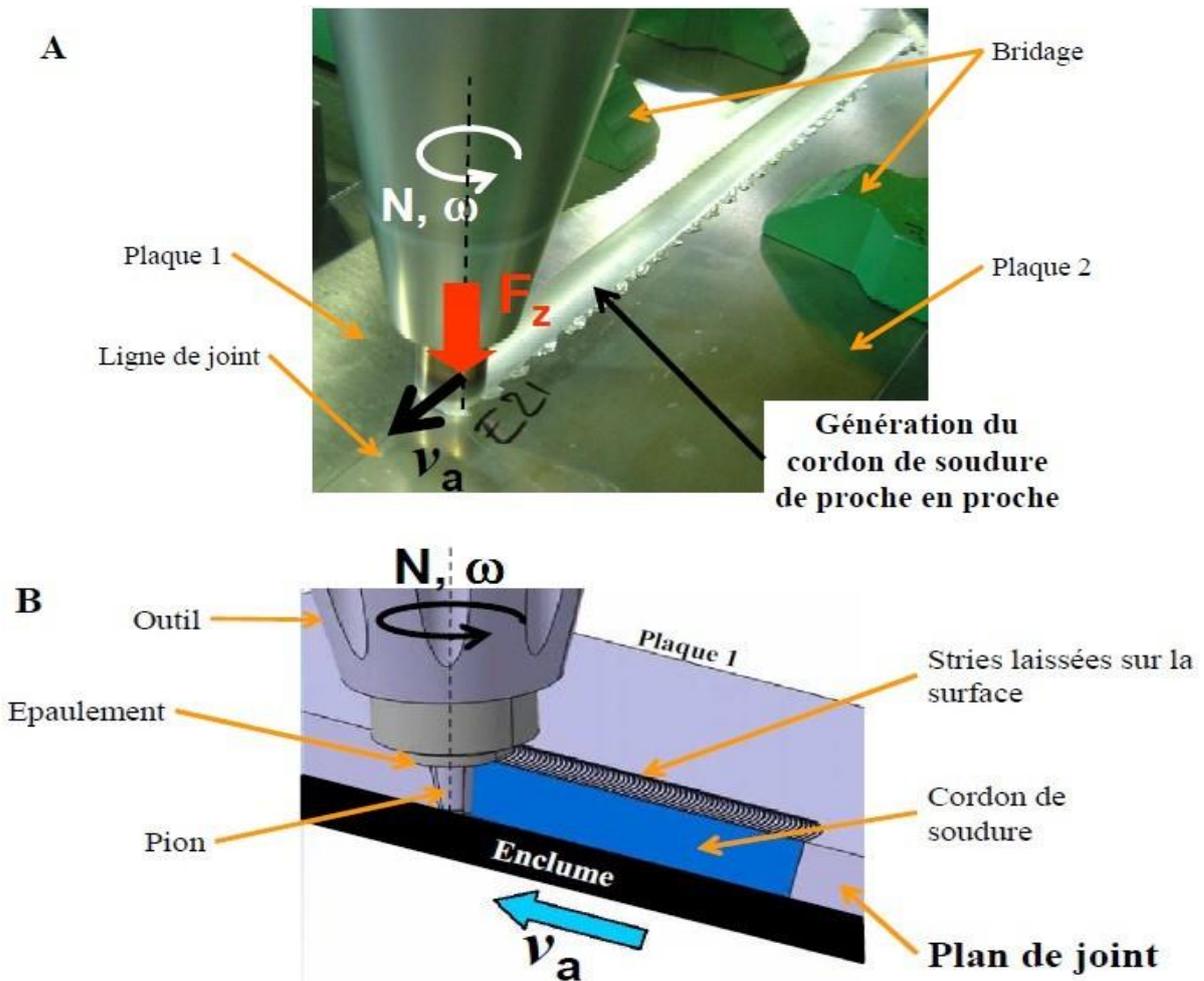
Problèmes liés à la solidification du joint qui apparaissent en utilisant les procédés de soudage Conventionnels (porosités, fissures à chaud...).

- **Rétraction de l'outil**

Lorsque le joint soudé est réalisé, l'outil encore en rotation est retiré des pièces. Suivant la technologie de soudage utilisée, il reste ou non en fin de soudage une empreinte Laissée par le pion [16]. Le principe de ce procédé est de réaliser une soudure de proche en proche en malaxant Localement la matière des deux pièces à assembler. La liaison métallurgique est obtenue à Chaud, mais en dessous de la température de fusion des matériaux. Comme la plupart de ces Procédés (soudage par friction, soudage par explosion...), le FSW a deux avantagesessentiels :

- Ne génère pas de soufflure ni de fissure à chaud.
- Permet de réaliser des soudures hétérogènes.

Pour réaliser une opération de soudage par friction-malaxage, les pièces à assembler sont Mises en position sans jeu, généralement sur une enclume, et bridées afin d'éviter tout Mouvement relatif de celles-ci au cours du soudage. Pour illustrer l'opération de FSW, Prenons la configuration la plus simple à savoir le soudage bout à bout de deux tôles présenté Par la Figure 2.



**Figure II-3 :** Présentation du soudage par friction malaxage. A-Soudure rectiligne de deux plaques mises bout about. B-Visualisation du plan de joint lors de la phase de soudure.

Il existe deux types de soudage par friction malaxage : le soudage linéaire (FSW) et le soudage par point (FSSW) [16].

### II.2.1. Soudage linéaire (FSW)

Les figures 4.5.6 rappellent les différentes étapes du soudage linéaire par friction malaxage. Lorsque le pion en rotation a complètement pénétré la matière et que l'épaulement est en contact avec la surface supérieure des pièces à assembler (étapes 1 et 2), l'outil de soudage est déplacé dans le plan de joint. La soudure est alors réalisée progressivement à mesure que l'outil avance (étape 3). A la fin du soudage, l'outil est retiré du cordon (étape 4), laissant apparaître un trou caractéristique laissé par le pion (étape 5).

### II.2.1.1. Phase d'approche et de pénétration

L'outil, de géométrie plus ou moins complexe, en rotation, pénètre progressivement dans l'interface des pièces à assembler avec une vitesse de descente. IL doit vaincre un couple Résistif important. L'élévation progressive de la température, due au frottement du pion, Entraîne un ramollissement de la matière qui facilite son insertion dans l'interface. La phase Descente s'achève lorsque l'épaulement rentre d'une distance définie par rapport à la surface Supérieure des pièces.

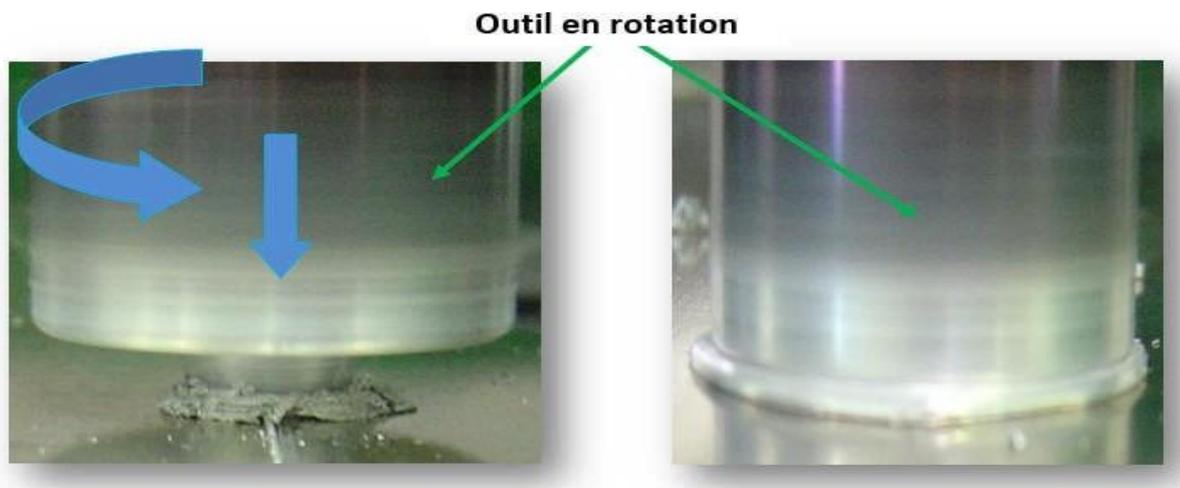


Figure II-4 : Présentation de la phase de pénétration [16].

### II.2.1.2. Phase de soudage

Après préchauffage, l'outil en rotation se déplace le long du joint par un mécanisme combiné d'extrusion par le pion et de forgeage par l'épaulement, le cordon est réalisé de proche en Proche.

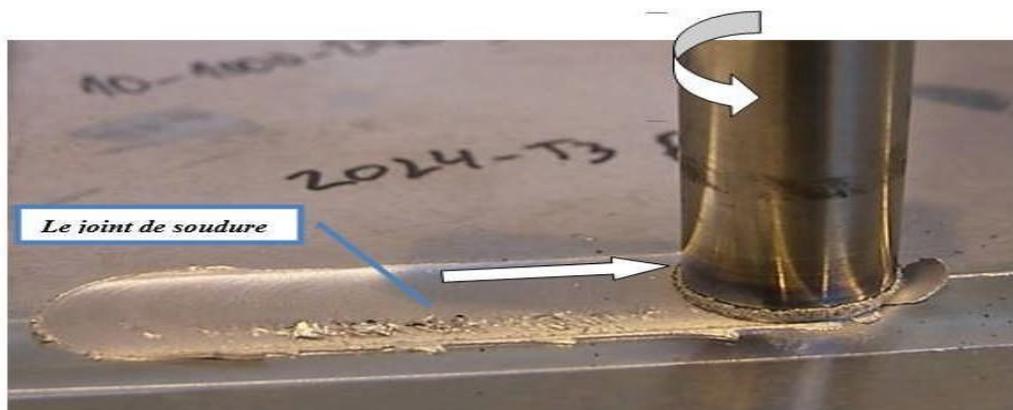
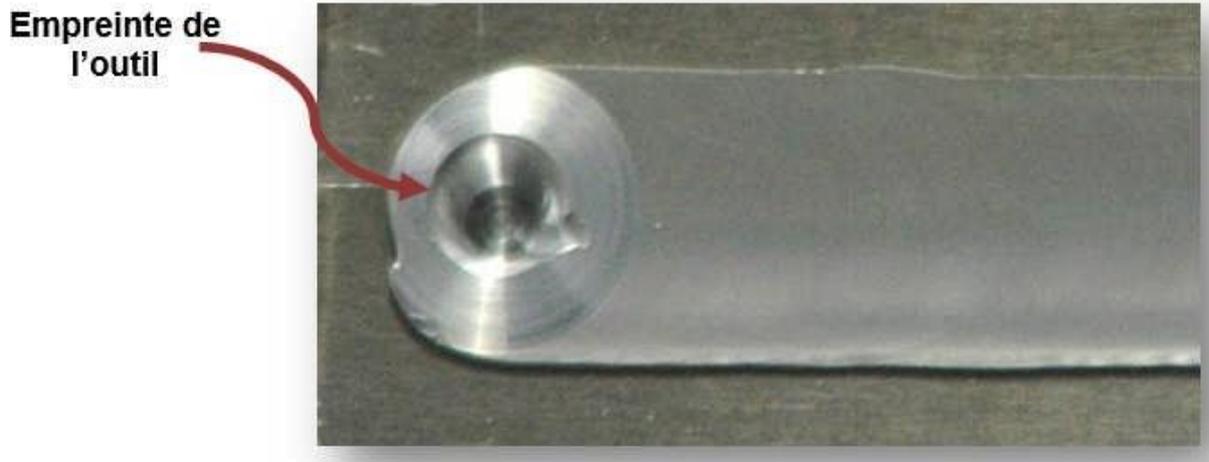


Figure II-5 : Présentation de la phase de soudage [16].

### II.2.1.3. Phase de retrait de l'outil

Une fois le cordon réalisé, l'outil est alors sorti de la matière. Selon le type d'outil utilisé, l'empreinte du pion à l'intérieur de la matière peut être présente au niveau de l'extraction du Pion.

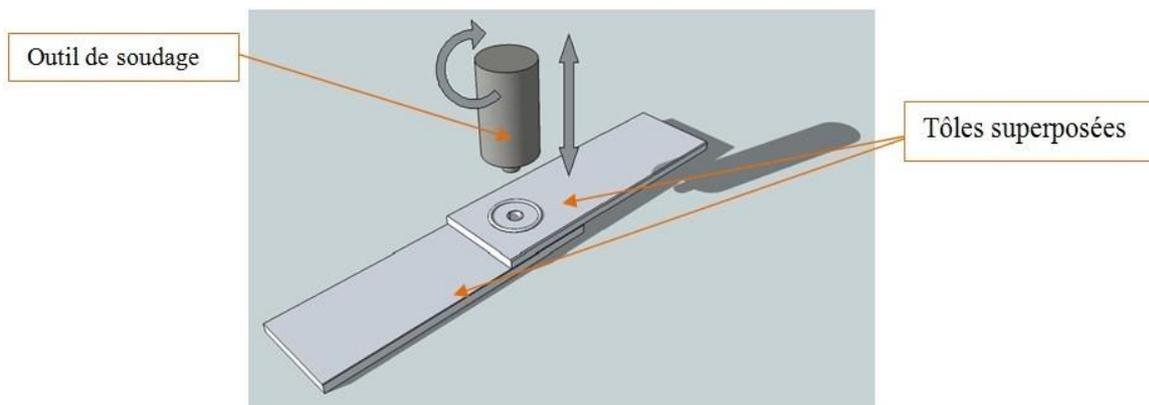


Empreinte de l'outil

Figure II-6 : Présentation de la phase de retrait de l'outil [16].

### II.2.2. Soudage par point par friction malaxage (FSSW)

Le soudage par point par friction malaxage, ou FSSW (Friction Stir Spot Welding), presque c'est le même principe que le soudage linéaire par friction malaxage sauf que les deux tôles le schéma de principe de la (figure 6). L'outil en rotation pénètre complètement la tôle supérieure et partiellement la tôle inférieure le pion permet alors un malaxage à l'interface des tôles en assurant la liaison métallique et en phase finale l'outil est rétracté en laissant une empreinte [17].



Outil de soudage

Tôles superposées

Figure II-7 : Illustration du procédé (FSSW) [17].

## II.3. Domain d'applications

### II.3.1. Applications actuelles

#### II.3.1.1. Construction navale

Parmi d'autres applications, on notera qu'en 1995 Tend setters, une société scandinave D'aluminium extrudé a été la première à appliquer le soudage par malaxage commercialement Pour la fabrication de panneaux creux d'aluminium trempé. Ces panneaux ont notamment été Utilisés pour la structure de ponts de bateau. [18]

De nos jours, les structures légères fabriquées par soudage par friction malaxage ont Révolutionné la construction des ferries à grande vitesse, des bateaux de croisières et des Hovercrafts (Figure 7et Figure 8).



*Figure II-8 : Panneaux préfabriqués (Hydro Marine Aluminium) destine au pont du bateau decroisière "The World" [18].*



*Figure II-9 : Bateau de croisière "The World" dont le pont est soudé par FSW [18].*

### II.3.1.2. Construction aéronautique

Dans ce secteur industriel, le facteur poids est capital. Le procédé de soudage FSW a un Avantage considérable en matière de diminution du poids des structures, facteur influençant Directement la consommation en carburant des appareils. Le procédé de soudage FSW offre Une alternative au rivetage systématique des différents ensembles. De plus, il permet une Réduction du temps d'assemblage par rapport au rivetage automatique. Une application a déjà Vu le jour en production de pièces de voilure et de fuselage. En effet, la société américaine Eclipse Aviation Corporation a intégré le procédé FSW dans la fabrication d'un jet, l'Eclipse 500, permettant ainsi la suppression de 60% des rivets [19].



Figure II-10 : Voilure d'avion soudée par FSW [19].

### II.3.1.3. Construction ferroviaire

Les fabricants européens (ALSTOM, SAPS, ...) et japonais (Hitachi) de tramways et de transUtilisent le FSW pour le soudage des profilés d'aluminium extrudés.

Il a été montré lors de crash tests que la tenue des rames soudées par FSW est améliorée. Les fabricants ont trouvé avec le procédé FSW un moyen de souder des profilés en Aluminium longs en limitant les déformations [20].

Le train, développé et fabriqué par Hitachi représenté sur la figure 9, est composé de profilés d'aluminiums soudés par FSW sur toute la longueur.



Figure II-11 : Soudage de profilé du train Hitachi [20].

#### II.3.1.4. Construction automobile

Une application intéressante, développée en suède, concerne la fabrication de pièces creuses en alliage d'aluminium, soudées par deux simultanément. L'installation est spécifique et comporte un plateau tournant. Elle disposée directement après les presses d'extrusion. La fabrication soudée de roues en aluminium retient l'attention des constructeurs. Diverses dispositions sont envisagées, parmi lesquelles le soudage longitudinal de cylindre Découpés ensuite en viroles élémentaires pour former les jantes ou, le soudage des flans et des jantes. Plusieurs constructeurs envisagent d'appliquer le soudage FSW à la réalisation de flans composites à épaisseur variable pour carrosseries en alliage d'aluminium (Tailored blanks). Le soudage par friction présenterait des avantages dans la qualité et la fiabilité des soudures par rapport au soudage par laser aujourd'hui utilisé.

#### II.3.2. Domaines futurs

##### II.3.2.1. Marine

- Panneaux et plates-formes en alliages légers
- Assemblages de profils juxtaposés
- Coques et superstructures
- Mâts et bras de grues

**II.3.2.2. Aéronautique**

De nombreux sont en cours pour confirmer la validité du procédé. Les applications visées concernent le soudage de raidisseurs de coques en remplacement du rivetage :

- Fuselages, ailes.
- Réservoirs cytogénétique.
- Rockets.
- Réservoirs de l'avion et réservoirs largables.

**II.3.2.3. Chemins de fer**

- Trains à grande vitesse.
- Wagons citernes.
- Containers.

**II.3.2.4. Automobile**

- Moteurs.
- Roues en aluminium.
- Flans composites (tailoredblancks).
- Châssis de camions.
- Véhicules blindés, Ets.

**II.4. Les avantages et les inconvénients du procédé de soudage(FSW)****II.4.1. Avantages de (FSW)**

Le procédé de soudage FSW présente les avantages suivants :

- pas de fusion de la matière (pas de fissuration),
- pas de métal d'apport,
- peu de déformations d'ordre thermique,

- pas de fumée, pas d'arc électrique, pas de gaz de protection, pas de projections,
- pas d'opération post-soudure,
- procédé automatisable,
- reproductibilité du procédé,
- possibilité de soudage hétérogène (matériaux différents)

#### II.4.2. Les inconvénients de (FSW)

Le procédé de soudage FSW présente les inconvénients suivants :

- installation de taille imposante,
- besoin d'un appui (forces transversales par l'arrière)
- bridage des pièces
- cratères en fin de soudure
- vitesses de soudage plutôt faibles

#### II.5. Paramètres du soudage par friction malaxage

Les principaux paramètres spécifiques au soudage par FSW sont les suivants

- l'effort axial  $F_z$  appliqué sur l'outil suivant son axe de rotation, afin de compenser la pression formée dans la zone de soudure [21],
- la vitesse de rotation  $\omega$ ,
- La géométrie de l'outil.
- la vitesse de soudage de l'outil ou vitesse d'avance  $V_a$ ,

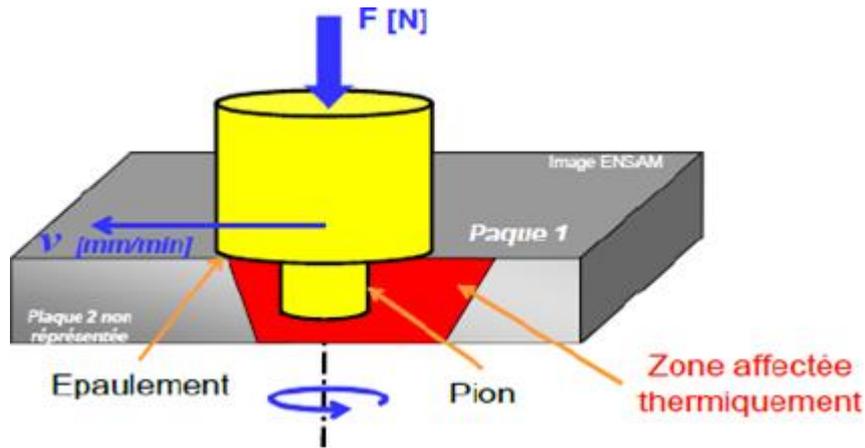


Figure II-12 : Visualisation des paramètres de soudage [21].

Ces paramètres sont à régler selon les matériaux, l'épaisseur soudée et la géométrie de l'outil. L'ensemble conditionne l'apport d'énergie, le flux de matière, la formation du cordon, les Propriétés mécaniques de l'assemblage et les efforts générés [22]. Évidemment, ces paramètres varient selon plusieurs facteurs. Il est donc nécessaire de Bien comprendre leurs effets pour obtenir une soudure de qualité. La qualité d'un joint FSW dépend grandement de l'outil et des paramètres de soudage. La Géométrie de l'outil est un facteur déterminant dans la distribution de la chaleur et la quantité de métal entraîné par l'outil [23]. Cependant, la vitesse d'avance, la vitesse de rotation de l'outil, la distance entre le Pion et la racine du joint, la force verticale exercée par l'outil et l'inclinaison de l'épaulement par rapport à la surface du joint sont des paramètres du procédé qui influencent la qualité du Joint. Ces paramètres varient en fonction du métal à souder, de la configuration du joint et de La géométrie de l'outil utilisé. Ils sont normalement déterminés expérimentalement après le Choix de l'outil [24].

## II.6. Les défauts génèrent par le malaxage

Le procédé FSW étant un procédé de soudage à l'état solide, il permet de s'affranchir des certains défauts liés à la fusion des matériaux de base (fissuration, porosités...). Toutefois, Ce procédé génère d'autres défauts qui lui sont propres [25].

Les défauts les plus couramment rencontrés sont :

- Défauts surfaciques : flash et brûlure Défauts internes
- Manque de liaison en racine (« kissing bond »),

- Manque de pénétration,
- Manque de liaison sur oxyde,
- Tunnel ou cavités.

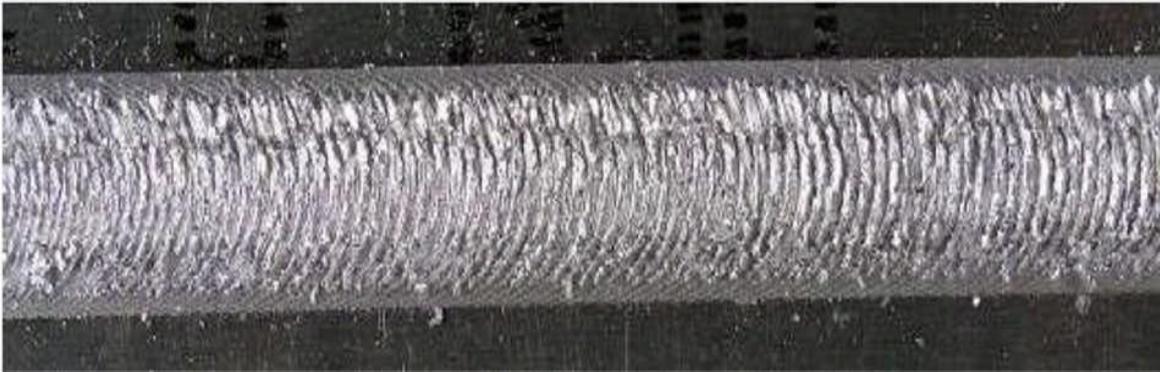
Le défaut de surface le plus couramment rencontré est le flash, (Figure II.11). Ce phénomène est observé lorsque la soudure est trop chaude, car la matière fuit sur les bords de l'outil. Ce défaut résulte d'une vitesse d'avance trop faible, d'une vitesse de rotation trop élevée, le tout cumulé à un effort trop important.



**Figure II-13 : Défaut de surface « flash »**

Lorsque la vitesse de rotation de l'outil est trop importante, il peut apparaître à la surface du cordon la formation de « pailles ». Celles-ci sont dues à un frottement excessif entre l'épaulement et la surface conduisant à la formation d'oxydes de même nature que ceux formés en cours d'une opération de laminage.

La (Figure 13) illustre ce type de défaut qui n'affecte cependant pas de façon significative la tenue mécanique du joint soudé. Par contre, ce défaut peut réduire la tenue à la corrosion de la surface du joint soudé.



*Figure II-14 : Défaut de surface « brûlure » [25].*

Bavures excessives (« Ribbon flash ») au niveau du bord de la soudure (figure 14). Ce défaut est un excès de métal le long du cordon de soudure [26]. Il provient d'un flux de Matière trop important sous l'épaulement entraînant l'expulsion de la matière sur les bords du cordon. Kim et al [27] attribuent ce défaut à une température trop élevée du matériau. Ils précisent que dans ces conditions, l'outil peut entrer en contact avec l'enclume. La présence de ce défaut est généralement corrélée avec un outil qui s'enfonce au sein du cordon de soudure et donc à un amincissement des tôles.



*Figure II-15 : Bavures excessives le long du joint (« Dibbon flash »).*

## **II.7. La méthode des surfaces de réponses (RSM)**

### **II.7.1. Modélisation de la méthode**

La méthodologie classiquement utilisée pour étudier l'influence de paramètres opératoires sur une variable d'intérêt consiste à modifier la valeur d'un paramètre tout en maintenant les autres fixes. L'exploitation des résultats et l'étude expérimentale peuvent être fortement simplifiées en utilisant la méthodologie des plans d'expérience. Cette technique

permet de créer un modèle statistiquement significatif d'un phénomène qui intègre les interactions entre les variables tout en optimisant le nombre d'essais [29].

La méthodologie des surfaces de réponse (RSM) est une technique statistique empirique utilisée pour l'analyse de régression multiple des données quantitatives obtenues à partir des expériences statistiquement conçues en résolvant les équations multi variables simultanément. La représentation graphique de ces équations s'appelle surfaces de réponse, et permet de décrire l'effet individuel et cumulatif des variables d'essai sur la réponse et de déterminer l'interaction mutuelle entre les variables d'essai et leur effet sur la réponse. L'objectif principal de la RSM est de déterminer les conditions opérationnelles optimales pour un système donné qui satisfasse les conditions spécifiques opératoires [29].

Le concept de surface de réponse modélise une variable dépendante Y, dite variable de réponse, en fonction d'un certain nombre de variables indépendantes (facteurs), x1, x2, ..., xk, permettant d'analyser l'influence et l'interaction de ces dernières sur la réponse. On peut ainsi écrire le modèle pour une réponse donnée (Y) sous la forme suivante :

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=0}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=1}^k \beta_{ij} x_i x_j \dots \dots \dots (2.1)$$

Où Y est la réponse observée,  $\beta_0$ ,  $\beta_i$ ,  $\beta_{ij}$ ,  $\beta_{ii}$  représentent respectivement le terme constant, les coefficients des termes linéaires, des termes représentant les interactions entre variable et des termes quadratiques, et  $\varepsilon$  représente l'erreur résiduelle. où Y est la réponse observée,  $\beta_0$ ,  $\beta_i$ ,  $\beta_{ij}$ ,  $\beta_{ii}$  représentent respectivement le terme constant, les coefficients des termes linéaires, des termes représentant les interactions entre variables et des termes quadratiques, et  $\varepsilon$  représente l'erreur résiduelle où x est la matrice d'expérience,  $x^t$  la transposée de x et  $(x^t x)^{-1}$  est l'inverse de la matrice  $(x^t x)$  :

$$\beta = (X^t X)^{-1} X^t Y \dots \dots \dots (2.2)$$

Y est le vecteur des réponses observées, représentant le pourcentage de photo dégradation, utilisant les variables indépendantes x1 (Concentration en para-crésol), x2 (Charge en catalyseur) et x3 (Débit de circulation) en valeurs codées [28].

Le modèle de prédiction est alors donné par l'équation (3) suivante :

$$Y_{pred} = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i x_i + \sum_{i=2}^2 \beta_{ij} x_i x_j \dots \dots \dots (2.3)$$

## II.8. Plans d'expériences

### II.8.1. Définition

Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles [30]. 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 l'on s'intéresse à une fonction du type :  $y = f(x_i)$  [30].

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 [29]. 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.

### II.8.2. 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 II.16). 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. [30].

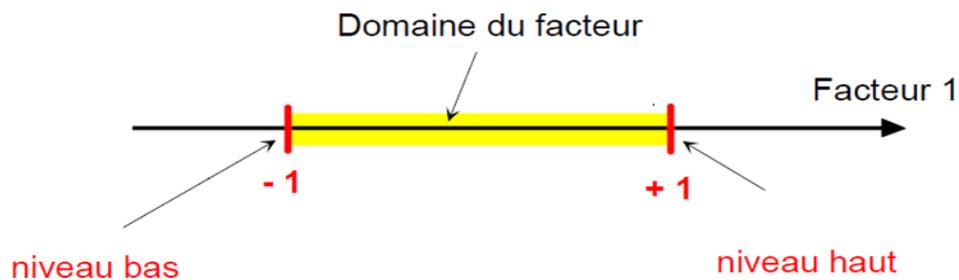


Figure II-16 : Domaine de variation du facteur

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].

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.

Les définitions qui ont été données s'appliquent bien aux variables continues. Mais il existe d'autres types de variables. Il y a les variables discrètes comme par exemple des personnes : Julien, Arthur, Louis, Simon et Nathan. On peut encore parler d'espace expérimental mais il n'aura pas les mêmes propriétés que l'espace des variables continues. Il y a également les grandeurs ordonnables comme, par exemple, des distances qui peuvent être courtes, moyennes et longues. Là aussi, la notion d'espace expérimental existe toujours mais cet espace possède des propriétés différentes des deux premiers [30].

### **II.8.2.1. Notion de surface de réponse**

Les niveaux  $x_i$  représentent les coordonnées d'un point expérimental et  $y$  est la valeur de la réponse en ce point. On définit un axe orthogonal à l'espace expérimental et on l'attribue à la réponse. La représentation géométrique du plan d'expériences et de la réponse nécessite un espace ayant une dimension de plus que l'espace expérimental. Un plan à deux facteurs espace à trois dimensions pour être représenté : une dimension pour la réponse, deux dimensions pour les facteurs [9].

A chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. A l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui se localisent sur une surface appelée la surface de réponse (Figure II.17).

Le nombre et de l'emplacement des points d'expériences est le problème fondamental des plans d'expériences. On cherche à obtenir la meilleure précision possible sur la surface de réponse tout en limitant le nombre d'expériences.

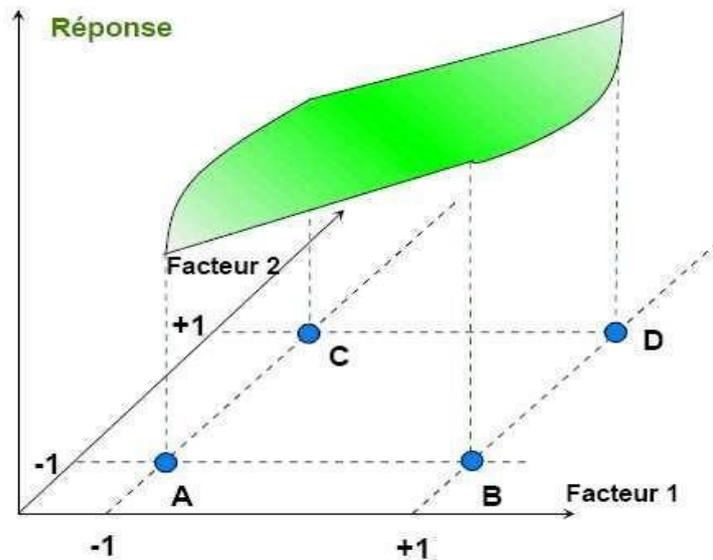


Figure II-17 : La surface de réponse

Les réponses associées aux points du domaine d'étude forment la surface de réponse. Les quelques réponses mesurées aux points du plan d'expériences permettent de calculer l'équation de la surface de réponses [30].

**II.8.2.2. Construction de la méthodologie de surface de réponse**

La méthodologie de surface de réponse consiste à représenter une réponse  $y$  comme la somme d'un méta modèle polynomial de faible degré (ordre un ou deux) et d'un terme d'erreur " ayant une distribution normale avec une moyenne nulle  $E(\epsilon) = 0$ . Avec la condition liée aux degrés de liberté  $N=p$  ( $N$  le nombre d'expériences et  $p$  le nombre de coefficients du modèle), et pour les situations les plus courantes  $N>p$ , les modèles utilisés ne passent pas exactement par les, points d'expériences. Les coefficients des polynômes modélisateurs sont alors calculés par l'équation II.2 :

$$Y=X\beta+\epsilon..... (2.4)$$

L'estimation  $\hat{\beta}$  du vecteur  $\beta$  doit être réalisée de telle façon que l'erreur de modélisation soit minimale. Le critère des moindres carrés traduit cette exigence par un objectif équivalent : Minimisation des carrés des écarts ou encore, en supposant la normalité de la valeur d'erreur  $\epsilon (N(0, \sigma^2))$ .

$$\| \epsilon \|^2 = \| Y - X\hat{\beta} \|^2 ..... (2.5)$$

Minimale telle que

$$\frac{\partial s^t}{\partial \beta} \dots \dots \dots (2.6)$$

L'expression a minimisé sur  $\beta$  s'écrit :

Nous faisons l'hypothèse supplémentaire que la matrice  $X^tX$  est inversible .Alors, l'estimation des paramètres des paramètres  $\beta$  est donnée par :

$$\| Y - X\hat{\beta} \|^2 = (Y - X\hat{\beta})(Y - X\hat{\beta}) = Y^tY - 2\beta^tX^tY + \beta^tY + X\hat{\beta} \dots \dots \dots (2.7)$$

L'estimation des paramètres  $\beta$  est donnée par :

$$\hat{\beta} = (X^tX)^{-1}X^tY \dots \dots \dots (2.8)$$

Les valeurs ajustées (ou estimées, prédites) de y ont pour expression :

$$\hat{Y} = X\hat{\beta}(X^tX)^{-1}X^tY \dots \dots \dots (2.9)$$

On note  $\varepsilon$  le vecteur des résidus :

$$\varepsilon = Y - \hat{Y} = Y - X\hat{\beta} = (I - (X^tX)^{-1}X^t) Y \dots \dots \dots (2.10)$$

**II.8.2.3. Validation du modèle**

Les valeurs expérimentales introduites dans le modèle présentent des erreurs expérimentales (grandeurs aléatoires) qui se transmettent aux coefficients  $\beta$  du modèle

$\hat{\beta} = (X^tX)^{-1}X^tY$ , puis aux valeurs calculées ( $\hat{Y}$ ). Des tests statistiques permettent d'évaluer la qualité du modèle et la significativité des coefficients [31].

**a. Ecart du résidu**

On distingue trois types d'écarts différents

- L'écart entre une réponse mesurée et la moyenne des réponses mesurées au même point expérimental (avec  $y_{x,1}$  et  $y_{x,2}$  deux réponses mesurées dont la moyenne est  $\bar{y}_x$ ). Il s'agit donc de l'erreur expérimentale, notée  $\sigma_y$ .

$$\sigma_{y,1} = Y_{i,1} - \bar{Y} \text{ et } \sigma_{y,2} = \bar{Y} \dots \dots \dots (2.11)$$

• L'écart entre la moyenne des réponses et la réponse prédite. Cette différence caractérise le manque d'ajustement. Elle est notée  $\Delta_i$  :

$$\Delta_i = Y_{i,1} - \hat{Y}_i \dots \dots \dots (2.12)$$

• L'écart entre chacune des réponses mesurées et prédites. Il s'agit donc de la somme des deux écarts précédents : liés au manque d'ajustement et à l'erreur expérimentale. Cet écart est le résidu et il a été noté  $\varepsilon_i$ .

$$\varepsilon_i = y_i - \hat{y}_i + \Delta_i \dots \dots \dots (2.13)$$

**b. Coefficients de détermination ( $R^2$ ,  $R^2_{ajusté}$ )**

$$R^2 = \frac{\hat{y}_t \cdot \hat{y}_t - \bar{y}_t \cdot \bar{y}}{y_t \cdot y_t - \bar{y}_t \cdot \bar{y}} \dots \dots \dots (2.14)$$

Le coefficient  $R^2$  peut s'interpréter comme le quotient de la variance expliquée par la variance des réponses mesurées. D'après la formule, ce rapport  $R^2$  varie entre 0 et 1. Une valeur proche de 1 correspond à un modèle prédictif.

Le coefficient de détermination ajusté  $R^2_a$  est défini de façon analogue, comme étant la fraction des variations de la réponse expliquée par le modèle seul, relativement aux degrés de liberté correspondants :

$$R^2_a = \frac{\varepsilon_t \cdot \varepsilon_t / d d l r}{y_t \cdot y_t - \bar{y}_t \cdot \bar{y} / d d l m} \dots \dots \dots (2.15)$$

**II.9. Les plans pour surfaces de réponses**

Les plans du second degré ou plans pour surfaces de réponse permettent d'établir des modèles mathématiques du second degré. Ils sont utilisés pour les variables continues. Pour deux facteurs, on a :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \varepsilon \dots \dots \dots (2.16)$$

Ces plans sont utiles à chaque fois que l'on se trouve près d'un maximum ou d'un minimum. La théorie développée au cours de la première partie de cet article s'applique à ces plans. A la fin des essais, on a un système d'équations dont les coefficients sont obtenus grâce à la relation :

$$\hat{\beta} = (X' X)^{-1} X' y \dots \dots \dots (2.17)$$

Il existe plusieurs types de plans du second degré dont les principaux sont décrits ci-dessous :

**II.9.1. Les plans composites centraux**

Les plans composites centraux sont un bon complément des plans orthogonaux, de par leurs propriétés statistiques, mais aussi parce qu'ils sont meilleurs que les plans orthogonaux pour certains problèmes. Ils sont développés, en particulier, dans la méthodologie de surface de réponse, et ils permettent l'étude d'un modèle quadratique, dans la plupart des cas des phénomènes non linéaires. Tous les facteurs pour lesquels on souhaite tester l'influence quadratique auront 5 niveaux. Les plans composites centraux sont constitués de trois parties, ce qui permet une démarche séquentielle.

Le plan d'expérience est constitué de trois parties :

- Le point au centre du domaine expérimental, usuellement noté par 0 répété plusieurs (n0) fois pour estimer la variance de répétabilité.
- Un plan orthogonal en nf essais, qui est le plus souvent un plan factoriel ou un plan de Box-Hunter, et qui combine des facteurs à 2 niveaux usuellement notés +1 et -1.
- Les points en étoile n δ essais. Ces points représentent 2 essais par facteur, usuellement notés +δ et -δ.

Selon, pour respecter le critère de presque orthogonalité, la valeur de δ doit être vérifiée par l'équation Equation (2.17) ci-dessous.

$$\delta = \sqrt[4]{\frac{nf(\sqrt{n} - \sqrt{nf})}{4}} \dots \dots \dots (2.18)$$

Le domaine de variation des facteurs est ramené à [-δ; +δ]. Ainsi, un facteur variant dans l'intervalle [Min ; Max] sera découpé en 5 niveaux, -δ, -1, 0, +1, +δ calculés selon le tableau:

Tableau II-1: Plans de Box-Behnken pour trois facteurs [30].

Niveau	Valeur réel
$-\delta$	$min$
-1	$\frac{min + max}{2} - \frac{1}{\delta} (max - \frac{min + max}{2})$
0	$\frac{min + max}{2}$
+1	$\frac{min + max}{2} + \frac{1}{\delta} (max - \frac{min + max}{2})$
$+\delta$	$max$

II.9.2. Les plans de Doehler

La caractéristique principale des plans de Doehlert est d'avoir une répartition uniforme des points expérimentaux dans l'espace expérimental. La Figure 6 donne la disposition de ces points pour un plan à deux facteurs (essais 1 à 7). Tous les points sont à la même distance du centre du domaine d'étude et sont situés sur le cercle trigonométrique. Ils forment un hexagone régulier.

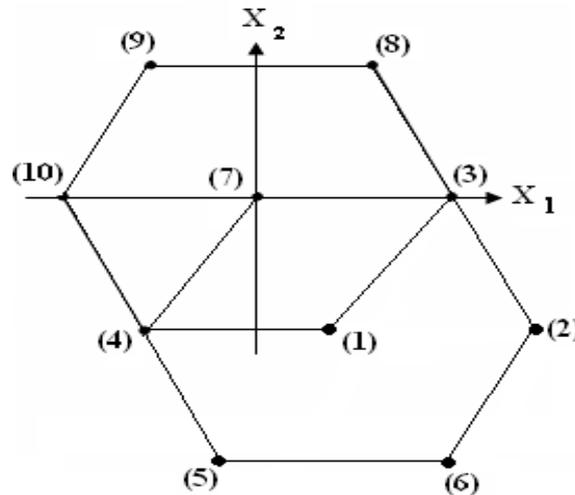


Figure II-18 : Plan de Doehlert [30].

Si l'expérimentateur désire explorer le domaine expérimental, il peut facilement ajouter des points d'expériences supplémentaires et retrouver une disposition identique à celle de départ. La Figure II.6 montre qu'avec trois points d'expériences supplémentaires (essais 8, 9 et 10), on peut obtenir un nouveau plan de Doehlert (essais 2, 7, 8, 9, 10, 3 et 1). Ce type de plans existe pour un nombre quelconque de facteurs.

### II.9.3. Les plans de Box-Behnken

Les points expérimentaux sont au milieu des arêtes de chacun des côtés du cube (Figure II.19). Ce plan comporte douze essais auxquels on peut ajouter un (ou plusieurs) point central. La matrice du Tableau 14 indique ces douze essais accompagnés d'un seul point central. Dans la pratique on réalise souvent 3 ou 4 points au centre.

Les plans de Box-Behnken répondent à un critère d'optimisation particulier : l'erreur de prévision des réponses est la même pour tous les points d'une sphère (ou une hyper sphère) centrée à l'origine du domaine expérimental. C'est le critère d'iso variance par rotation. Le plus connu des plans de Box-Behnken est celui qui permet d'étudier trois facteurs.

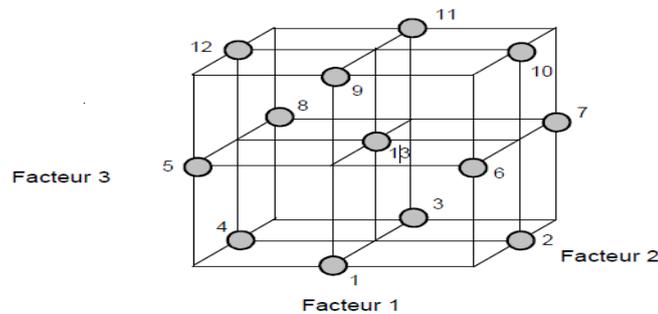


Figure II-19 : Plan de Box- Behnken pour trois facteurs [30].

Tableau II-2: Plan de Box- Behnken pour 3 facteurs [30].

N° essai	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3
1	0	-1	-1
2	+1	0	-1
3	0	+1	-1
4	-1	0	-1
5	-1	-1	0
6	+1	-1	0
7	+1	+1	0
8	-1	+1	0
9	0	-1	+1
10	+1	0	+1
11	0	+1	+1
12	-1	0	+1
13	0	0	0

**II.10. Analyse de la variance (ANOVA)**

L'analyse de la variance (terme souvent abrégé par le terme ANOVA : *Analysais Of Variance*) est un permettant de vérifier que plusieurs échantillons sont issus d'une même population [31].

Ce test s'applique lorsque l'on mesure une ou plusieurs variables explicatives catégorielles (appelées alors facteurs de variabilité, leurs différentes modalités étant parfois appelées « niveaux ») qui ont de l'influence sur la distribution d'une variable continue à expliquer. On parle d'analyse à un facteur, lorsque l'analyse porte sur un modèle décrit par un facteur de variabilité, d'analyse à deux facteurs ou d'analyse multifactorielle [31].

**II.10.1. La variance**

Selon la définition classique, la variance est la moyenne des carrés des écarts par rapport à la moyenne. On a *n* observations d'une variable, chaque observation pouvant être désignée comme *x<sub>i</sub>*, leur moyenne est égale à

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \dots\dots\dots (2.19)$$

C'est-à-dire : la moyenne est égale au quotient qu'on obtient en divisant par le nombre *n* des données la somme de toutes les valeurs observées de la variable (de la première à la *n*ème). Ceci posé, la variance est une autre moyenne, celle qu'on obtient à partir du carré des différences qui séparent les *n* observations de la moyenne *X* :

C'est-à-dire : la variance est égale au quotient qu'on obtient en divisant par le nombre *n* des données la somme des carrés de toutes les différences qui séparent les observations individuelles de leur moyenne commune. En fait, surtout avec les moyens modernes de calcul, il est beaucoup plus facile d'obtenir la variance avec des données pour lesquelles on n'a pas besoin de connaître d'avance la moyenne *X* :

$$Var x = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n} - \left( \frac{\sum x_i}{n} \right)^2 \dots\dots\dots (2.20)$$

En d'autres termes : on calcule la somme des *x*, et en même temps la somme de leurs carrés ; si nous appelons *S* la somme des *x* et *SS* la somme des carrés de *x*, nous divisons par *n* le carré de *S* et nous retirons de *SS* le quotient, après quoi nous divisons par *n* la différence obtenue. Les trois formulations ci-dessus sont strictement équivalentes [31].

**II.10.2. Hypothèses fondamentales**

La forme générale de l'analyse de variance repose sur le test de Fisher et donc sur la normalité des distributions et l'indépendance des échantillons [31].

**II.10.3. Hypothèses à tester**

L'hypothèse nulle correspond au cas où les distributions suivent la même loi normale. L'hypothèse alternative est qu'il existe au moins une distribution dont la moyenne s'écarte des autres moyennes :

- $H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k = \mu$
- $H_1 : \exists (i, j) \text{ tel que } \mu_i \neq \mu_j$

**II.11. Teste de fisher–Snedecor (F)**

Le test de Fisher, parfois appelé aussi test de Fisher-Snedecor, qui sert à la comparaison de deux variances observées. La loi de Fisher survient très fréquemment en tant que loi de la statistique de test lorsqu'une hypothèse nulle est vraie, dans des tests statistiques, et dans l'analyse de la variance (ANOVA) via le test de Fisher. Une variable aléatoire réelle distribuée selon la loi de Fisher peut être construite comme le quotient de deux variables aléatoires indépendantes,  $U_1$  et  $U_2$ , distribuées chacune selon une loi du  $\chi^2$  et ajustées pour leurs nombres de degrés de liberté, respectivement  $d_1$  et  $d_2$  :

$$F(d_1, d_2) \sim \frac{U_1/d_1}{U_2/d_2} \dots \dots \dots (2.21)$$

La densité de probabilité d'une loi de Fisher,  $F(d_1, d_2)$ , est donnée par :

$$f(x) = \frac{\left(\frac{d_1 x}{d_1 x + d_2}\right)^{\frac{d_1}{2}} \left(1 - \left(\frac{d_1 x}{d_1 x + d_2}\right)\right)^{\frac{d_2}{2}}}{XB\left(\frac{d_1}{2}, \frac{d_2}{2}\right)} \dots \dots \dots (2.22)$$

Pour tout réel  $x \geq 0$ , où  $d_1$  et  $d_2$  sont des entiers positifs et  $B$  est la fonction bêta [32]

**II.12. 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  $ddl$ ). [31].

D'une façon générale, en matière de régression, le principe de l'analyse de la variance est de subdiviser la variation totale en une composante factorielle relative à l'équation de régression ou au modèle utilisé, et en une composante résiduelle, la première devant être testée par rapport à la deuxième » [33].

Supposons que nous disposions de  $N$  observations désignées par  $y_{ijk}$  ( $i = 1, \dots, p$  ;  $j = 1, \dots, q$ ;  $k = 1, \dots, n$ ). Les deux premiers indices concernent les deux facteurs contrôlés (avec respectivement  $p$  et  $q$  modalités, et donc un nombre total d'objets égal à  $p \times q$ ). Le troisième indice concerne les répétitions ( $n$  répétitions de chacun des  $p \times q$  objets). Dans ces conditions, nous pouvons calculer  $p \times q$  moyennes  $y_{ij}$  relatives aux différents objets,  $p$  moyennes  $y_{i\cdot}$  relatives aux différentes modalités du premier facteur,  $q$  moyennes  $y_{\cdot j}$  relatives aux différentes modalités du deuxième facteur, et une moyenne générale  $y_{\cdot\cdot\cdot}$ . Les étapes d'analyse sont les suivantes :

**II.12.1. Le modèle observé**

$$y_{ijk} - y_{\cdot\cdot\cdot} = (\bar{y}_{i\cdot\cdot} - \bar{y}_{\cdot\cdot\cdot}) + (\bar{y}_{\cdot j} - \bar{y}_{\cdot\cdot\cdot}) + (\bar{y}_{ij} - \bar{y}_{i\cdot\cdot} - \bar{y}_{\cdot j} + \bar{y}_{\cdot\cdot\cdot}) + (\bar{y}_{ijk} - \bar{y}_{ij}) \dots \dots \dots (2.23)$$

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

**II.12.2. Les nombres de degrés de liberté**

Le nombre de degrés de liberté associé à un facteur xi est le nombre de niveaux  $N_{xi}$  qu'il prend lors de la réalisation du plan, minoré de 1. Les nombres de degrés de liberté sont additifs:

$$N_{xi} - 1 = pqn - 1 = (p-1) + (q-1) + (p-1)(q-1) + pq(n-1) \dots \dots \dots (2.24)$$

**II.12.3. L'équation de l'analyse de la variance**

En élevant au carré les deux membres de la relation (4.9) et en sommant pour toutes les observations, on obtient l'équation de l'analyse de la variance :

$$\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^n (y_{ijk} - \bar{y})^2 = qn \sum_{i=1}^p (\bar{y}_{i..} - \bar{y}_{....})^2 + pn \sum_{j=1}^q (\bar{y}_{.ij} - \bar{y}_{i..} - \bar{y}_{.j.} + \bar{y}_{....})^2 + \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^n (\bar{y}_{ijk} - \bar{y}_{ij.})^2 \dots\dots\dots (2.25)$$

En utilisant l'indice a pour le premier facteur et l'indice b pour le deuxième facteur, l'équation (2.26) s'écrit :

$$SCE_t = SCE_a + SCE_b + SCE_{ab} + SCE_r \dots\dots\dots (2.26)$$

Avec :

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

Enfin, en divisant les sommes des carrés des écarts par leurs nombres de degrés de liberté, on définit les carrés moyens, à savoir :

- Le carré moyen total :  $CM_t = SCE_t / (pqn - 1)$  (2.27)
- Le carré moyen factoriel :  $CM_a = SCE_a / (P - 1)$ ... (2.28)
- La carré moyen relatif à l'interaction :  $CM_{ab} = SCE_{ab} / ((p - 1)(q - 1))$ ... (2.29)
- Le carré moyen résiduel :  $CM_r = SCE_r / (pq(n - 1))$ ..... (2.30)

Ces quantités sont des mesures, respectivement, de la dispersion de l'ensemble des observations (variation totale), de l'importance des différences existant entre les moyennes relatives aux différentes modalités (variation factorielle), et de l'importance des variations apparaissant à l'intérieur des différentes modalités (variation résiduelle).

#### II.12.4. Analyse de la variance résiduelle

La variance résiduelle est liée aux écarts entre les réponses mesurées et les réponses estimées. Elle permet de juger de la qualité du modèle linéaire indépendamment du nombre d'essais réalisés. L'analyse de la variance permet de déterminer l'aptitude du modèle à décrire

Les variations de la réponse en comparant les variations expliquées et celles non 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  $\sigma^2$  peut être décomposée en deux sources de variabilité :
  1. La variabilité intrinsèque du système étudié ;
  2. La variabilité due à des facteurs aléatoires non contrôlés au cours des essais.

#### II.13. Régression linéaire multiple

Une analyse de régression où la variable dépendante  $Y$  dépend linéairement de plusieurs variables indépendantes  $X_1, X_2, \dots, X_j$  est appelée régression linéaire multiple.[34]

L'équation de régression linéaire multiple est de la forme :

$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_j)$  où  $f(X_1, X_2, \dots, X_j)$  est une fonction linéaire de  $X_1, X_2, \dots, X_j$ . Le modèle mathématique peut se présenter sous la forme :

$$Y^i = a + \sum_{j=1}^{j=p} b_j x_j^i \dots \dots \dots (2.31)$$

Où  $(b_j)$  sont les coefficients de régression et  $(a)$  la constante de régression.

##### II.13.1. Description de la méthode

La régression multilinéaire est la méthode la plus simple et la plus employée pour le développement de modèles prédictifs. Elle repose sur l'hypothèse qu'il existe une relation linéaire entre une variable dépendante  $Y$  (la propriété étudiée) et une série de  $p$  variables

indépendantes  $X_i$  (les descripteurs) [35].

L'objectif est d'obtenir une équation de la forme suivante :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_p X_p + \varepsilon \dots \dots \dots (2.32)$$

Où  $\beta_i$  sont les coefficients de la régression.

La détermination de l'équation (2) se fait alors à partir d'une base de données de  $n$  échantillons pour laquelle à la fois les variables dépendantes et la variable indépendante sont connues. Il s'agit donc de considérer un système de  $p$  équations.

$$Y_1 = \beta_0 + \beta_1 X_{1,1} + \beta_2 X_{2,1} + \dots + \beta_p X_{n,1} + \varepsilon_1$$

$$Y_2 = \beta_0 + \beta_1 X_{1,2} + \beta_2 X_{2,2} + \dots + \beta_p X_{n,2} + \varepsilon_2$$

$$Y_n = \beta_0 + \beta_1 X_{1,n} + \beta_2 X_{2,n} + \dots + \beta_p X_{n,n} + \varepsilon_n$$

Où les résidus  $\varepsilon_i$  représentent l'erreur du modèle, constituée par l'incertitude sur la variable dépendante  $Y_i$  d'une part, sur les variables indépendantes  $X_i$  d'autre part, mais aussi par les informations contenues dans les variables indépendantes mais non exprimées via les variables dépendantes.

Ce système d'équations peut être écrit sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & X_{1,1} & X_{2,1} & \dots & X_{p,1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & X_{n,1} & X_{n,2} & \dots & X_{n,p} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{pmatrix}$$

La matrice  $X(n,p)$  comporte dans sa première colonne un vecteur constitué uniquement de 1. Ce vecteur correspond à la constante  $X_0$ . La matrice  $X$  est alors de

dimension (n, p+1).

Le modèle s'écrit alors sous forme

$$Y = Xb + \varepsilon \dots\dots\dots (2.33).$$

La méthode consiste alors à choisir les coefficients du vecteur  $\beta$  en faisant en sorte de minimiser la somme des carrés des écarts entre les valeurs prédites et les valeurs réelles sur l'intégralité de la base de données et ceci sous couvert de certaines hypothèses de départ.

En premier lieu, les variables indépendantes  $X_i$ , comme leur nom l'indique, sont supposées indépendantes entre elles et leur incertitude est négligeable. Ensuite, les différents échantillons  $Y_i$  sont supposés indépendants entre eux. Enfin, par nature, la dépendance de  $Y$  vis-à-vis des  $X_i$  est supposée linéaire.

La valeur prédite de la variable dépendante est alors :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots\dots\dots + \beta_n X_n \dots\dots\dots (2.32)$$

Les résidus peuvent donc être définis comme la différence entre les valeurs prédites et observées de  $Y$ .

$$\varepsilon = y_i - \hat{Y}_i \dots\dots\dots (2.33).$$

**Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présentes les étapes du procèdes de soudage FSW et les déférentes modélisations. et une étude sur les plans d'expérience, les modèles de régression linière et l'analyse de la variance.

*Chapitre III*  
*Modélisation*  
*expérimental du FSW*

## Introduction

De nos jours, le soudage par friction-malaxage est un procédé d'assemblage très utilisé dans divers secteurs industriels (automobile, aéronautique, naval et armement). Cependant, la réalisation de soudures de qualité rime souvent et forcément avec une consommation élevée de l'énergie. Dès lors, la modélisation et l'optimisation de la résistance à la rupture des pièces soudées ainsi que de la puissance électrique consommée lors de l'opération de soudage, est d'un intérêt certain. Le paramètre de soudages sélectionnés dans cette étude sont ; la fréquence de rotation de l'outil, la vitesse de soudage et la forme de l'outil. Le matériau à souder est un alliage d'aluminium AA6061, choisi du fait de sa large utilisation en construction mécanique.

Pour se faire, deux modèles mathématiques de type surface de réponse (RSM), reliant la résistance à la rupture et la puissance électrique consommée avec les paramètres de soudage, ont été développés grâce à la méthodologie de plan d'expériences et la régression linéaire multiple avec un pouvoir de prédiction acceptable 94% pour la résistance à la rupture et 93% pour la puissance électrique consommée. L'analyse de la variance (ANOVA) a mis en évidence l'importance des certains paramètres de soudage vis à vis les réponses étudiées.

### III.1. Procédure expérimentale

Les expérimentations FSW ont été réalisées sur une fraiseuse universelle ALMO\_FH 1.6 (Fig.III.1). A chaque essai, deux plaques en alliage d'aluminium AA3004-H32 de dimensions 70 x 40 x 6 mm<sup>3</sup> chacune, sont fixées par quatre brides étagées (Fig.III.2) et ensuite soudées bout à bout.



*Figure III-1 : Fraiseuse universelle modifiée de type FH 1.6 ALMO*

Le processus de soudage par friction-malaxage est présenté sur la figure III .2.



**Figure III-2 :** Plaques fixées par brides étagées pour un soudage FSW bout à bout.

**Tableau III-1:** Composition chimique d'AA30044-H32

Élément	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Autre élément
% en poids	0,70	28	0,21	0,12	0,99	0,6	0,088	0,047	0,86

### III.1.1. Variables d'entrées

Les facteurs ou les paramètres de soudage pris en considération sont :

- La fréquence de rotation de l'outil N [tr/min]
- La vitesse de soudage ou d'avance de l'outil [mm/min]
- La forme du pion

### III.1.2. Variables de sorties

Les réponses étudiées sont :

- La puissance électrique consommée dans la phase de soudage [Watt]
- La résistance à la rupture du joint soudé [MPa]

## III.2. Conception des outils FSW

Les outils utilisés en soudage par friction-malaxage sont en acier mi-dur XC48. Ce matériau est généralement très résistant de façon à supporter des efforts lors du soudage et assez dur pour résister à l'usure.

Trois formes de pions ont été usinées par tournage ; une forme conique, une forme cylindrique et une autre cylindrique filetée à la filière (Fig.3).



**Figure III-3 :** Les outils de soudage de FSW utilisés.

Dans certaines applications, le pion est excentré par rapport à son axe de rotation dans Le but d'amplifier le malaxage. Plusieurs recherches sont orientées vers l'optimisation deLa géométrie du pion. L'épaulement est globalement plan, ses dimensions transversales restent suffisammentGrandes soit environ cinq fois le diamètre du pion afin de couvrir totalement la zone Affectée par le soudage. Il joue ainsi deux rôles principaux ; d'une part, il empêche le Métal malaxé de fluer vers le haut et, d'autre part, il chauffe la matière par frottement.

**Tableau III-2:** Descriptions des outils

No	Description de pion	Diamètre de pion	L'angle de pion	Pas de filtrage
1	Cylindrique	6 mm	–	–
2	conique	6 mm	15	–
3	Cylindrique filetés	6 mm	–	1mm

### III.3. Plan d'expérience

Une campagne de 15 essais a été menée selon le plan d'expérience Box–Behnken (Tableau 3). Ce type de plan est très adapté à la construction de modèles mathématiques de

surface de réponse. En effet, le nombre d'expériences à réaliser est réduit et le pouvoir prédictif (coefficient de détermination) des modèles est proche de 100% la plupart du temps.

**Tableau III-3:** Plan d'expérience Box-Behnken codé et la puissance du moteur électrique, la résistance à la rupture

N° de l'essais	N [tr/min]	V [mm/min]	F	Pc [Watt]	Rr [MPa]
1	0	-1	-1	2821,41	102,66
2	+1	0	-1	3721,86	124,33
3	0	+1	-1	2461,23	78,66
4	-1	0	-1	2587,29	96,33
5	-1	-1	0	3211,6	92
6	+1	-1	0	4082,04	127
7	+1	+1	0	4550,27	106,33
8	-1	+1	0	3469,73	91,33
9	0	-1	+1	3562,78	115,33
10	+1	0	+1	4246,12	136
11	0	+1	+1	3790,89	105,5
12	-1	0	+1	2305,15	105,33
13	0	0	0	3721,86	94,33
14	0	0	0	3901,95	89
15	0	0	0	3631,81	92,66



**Figure III-4 :** Exécution de l'opération de soudage par friction et malaxage.

Trois essais de répétitions au centre (N° 13, 14 et 15) sont réalisés afin de quantifier la variabilité naturelle (erreur) des réponses mesurées. Trois niveaux sont assignés à chaque facteur dans le but de modéliser le comportement non linéaire des réponses étudiés (Tableau4).

**Tableau III-4:** niveaux des facteurs utilisés dans le plan d'expérience

Facteurs	Les niveaux		
	-1	0	+1
N [tr/min]	710	1000	1400
V [mm/min]	34	43	54
F	Cylindrique	Conique	Cylindrique fileté

### III.4. La puissance électrique consommée

A chaque essai, une mesure du courant électrique sur une des trois phases alimentant le moteur électrique de la machine-outil a été effectuée durant la phase de soudage l'aide d'une pince multimètre (Fig.5).



**Figure III-5 :** Pince multimètre LUNI-T.

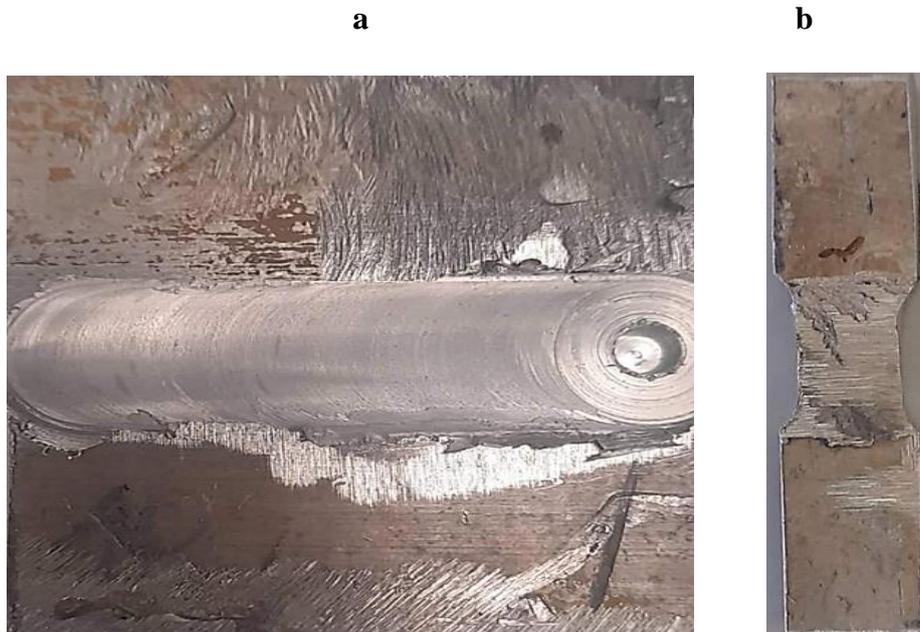
La puissance électrique consommée  $P_c$  [Watt] pendant le soudage est donc calculée par la relation suivante :

$$P_c = I \cdot U \cdot \cos \varphi \cdot 3 \dots \dots \dots (3.1)$$

Avec ( $\cos \varphi = 0.87$ ) est le facteur de puissance du moteur électrique.

### III.5. Résistance à la rupture

Trois éprouvettes sont découpées de chaque plaque soudée (Fig.3.) avec précaution, pour éviter toute altération de la structure de la zone soudée (écrouissage, échauffement et fatigue). La taille de l'éprouvette est de 70 x 15 x 6 mm<sup>3</sup> avec une réduction de section dans la zone soudée.



**Figure III-6 :** Plaques soudées bout à bout (a). Eprouvette de traction (b).

Les essais de traction sur ces éprouvettes (Fig.III.8) sont réalisés à l'aide d'une machine universelle de marque PHYWE d'une capacité maximale de 30 KN.



*Figure III-7 : Machine de traction PHYWE d'éprouvettes plates*

### III.6. Résultats et discussions

Sur la base des résultats d'investigation menées, la régression linéaire multiple a été utilisée à l'aide du logiciel de statistiques STATISTICA™ afin déterminer les coefficients des modèles de surface de réponses pour les deux réponses mesurées (puissance électrique consommée, résistance à la rupture). Les effets moyens de chaque facteur sur les réponses étudiées sont également présentés.

### III.7. La régression linéaire et l'analyse de la variance (ANOVA)

#### III.7.1. La puissance électrique consommée

Les coefficients du modèle de surface de réponse sont donnés dans le tableau de régression ci-dessous, dont seulement les facteurs significatifs et leurs interactions sont pris en considération. L'importance de chaque facteur dans le modèle est mise en évidence par le test de Student et le P-value. On peut remarquer que l'interaction NV est la plus significative dans le modèle après la moyenne bien sûr. Le coefficient de détermination du modèle est égal à 0,9381. Cela signifie que ce modèle explique 93,8% des valeurs de puissance électrique mesurées.

Tableau III-5: Régression linéaire multiple (puissance consommée)

<b><math>R^2</math> adj=93,81%</b>				
<b>F(6,8)=36,415 P&lt;0,0002 Erreur d'estimation : 165,93</b>				
<b>Variable N15</b>	<b>Coefficient de modèle b</b>	<b>Erreur de coefficient de modèle b</b>	<b>Teste de student</b>	<b>p-value</b>
<b>moyenne</b>	2499,6252	156,100061	16,012968	<b>0</b>
<b>F</b>	-4749,322738	1127,14564	-4,213584	0,002941
<b>NV</b>	0,028729	0,003314	8,668345	0,000024
<b>NF</b>	9,485758	2,187798	4,335756	<b>0,002493</b>
<b>NF<sup>2</sup></b>	0,909735	0,206025	4,415652	0,002239
<b>VF<sup>2</sup></b>	-35,104591	4,949464	-7,092604	0,000103
<b>FN<sup>2</sup></b>	-0,004219	0,001018	-4,144492	0,003233

Le facteur N a une influence monotone et croissante sur Pc (Fig.10) contrairement à la forme du pion F (Fig.12). Les facteurs le plus influents sur Pc sont d'abord N avec un P-value égal à 0,2 % (risque d'effet réel nul) et ensuite F avec un P-value égal à 1,10 % (risque d'effet réel nul). La vitesse de soudage V a un effet non significatif voire négligeable avec un risque d'effet réel nul égal à 83.5 %.

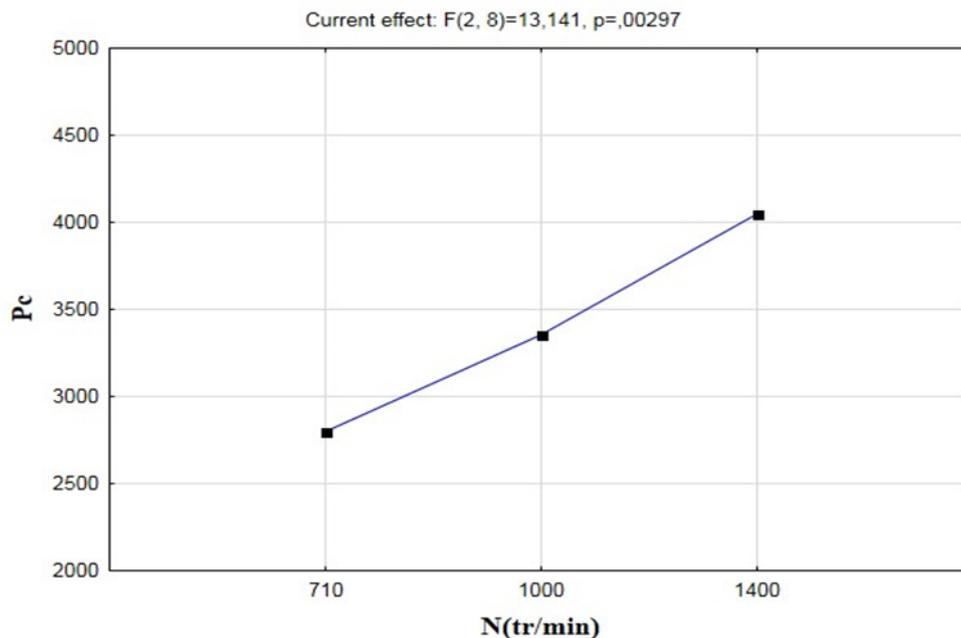
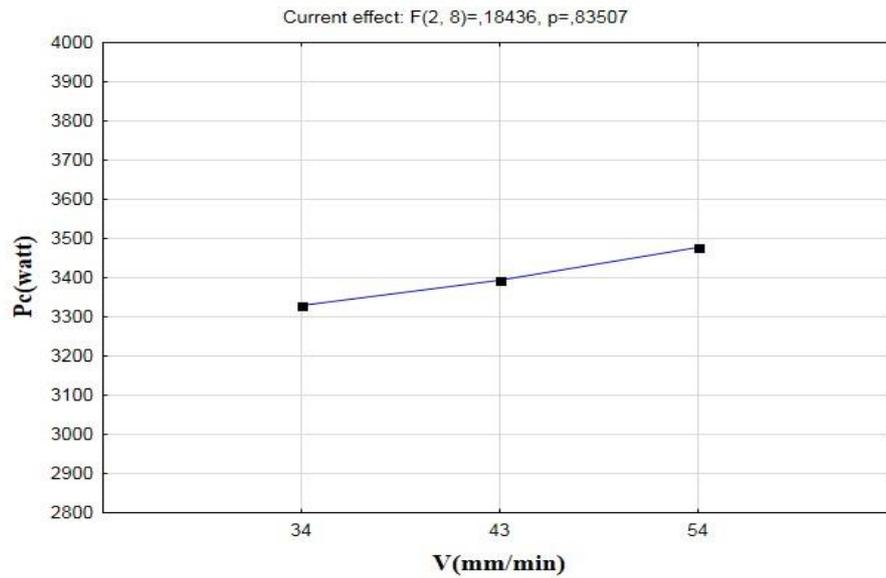
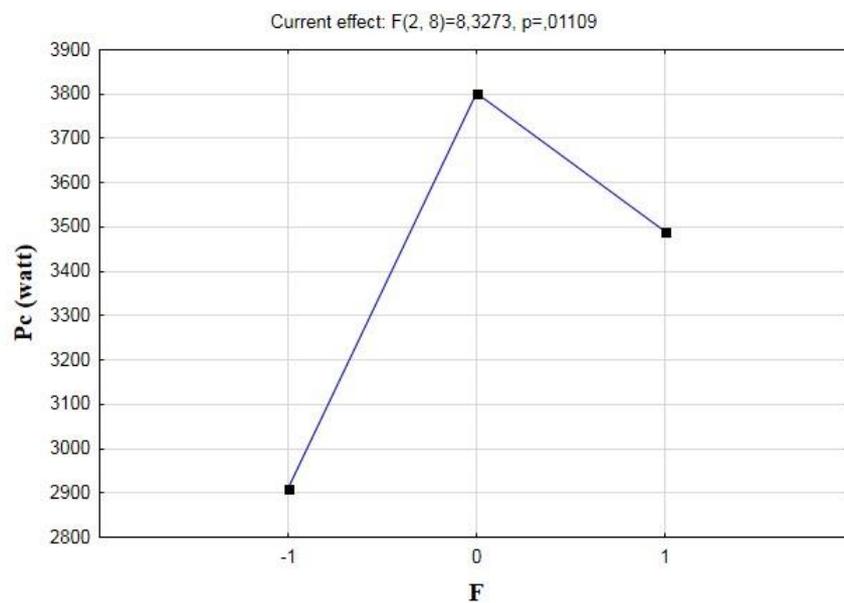


Figure III-8 : Effet moyen de la fréquence de rotation sur la puissance électrique consommée.



**Figure III-9 :** Effet moyen de la vitesse de soudage sur la puissance électrique consommée.

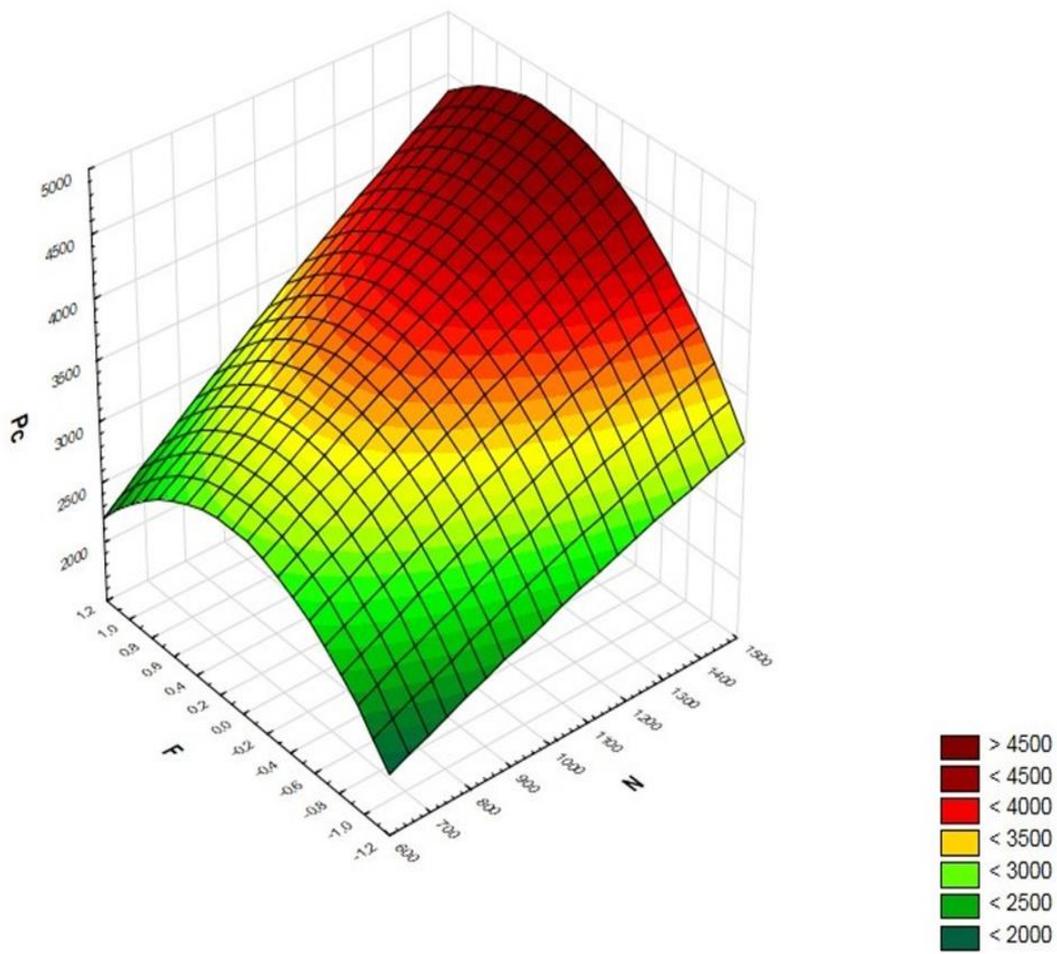
On peut dire que la forme conique du pion (valeur codée 0) est la plus énergivore comparée aux autres. La forme cylindrique est la plus économique en termes de consommation d'énergie électrique.



**Figure III-10 :** Effet moyen de la forme du pion sur la puissance électrique consommée.

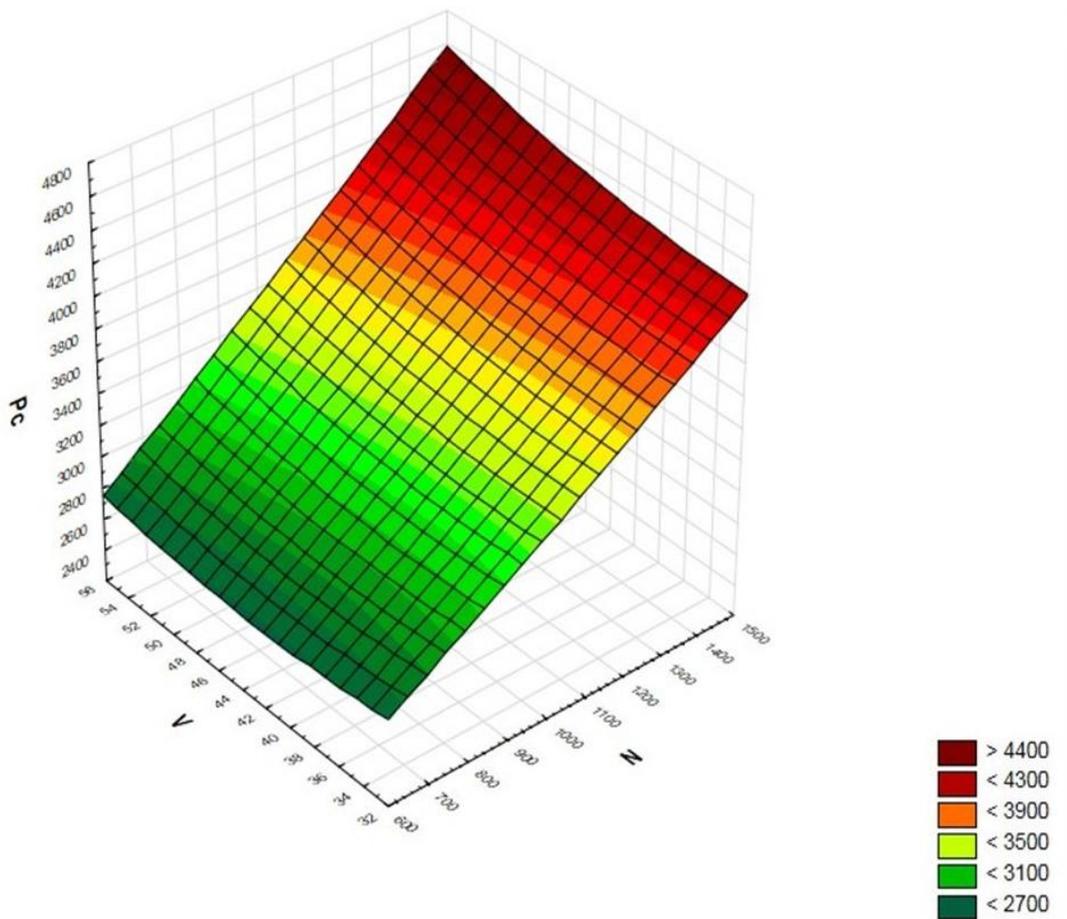
La Surface de réponse (Fig III-11) montre que la puissance électrique consommée est minimale lorsque N est minimale et pour une forme cylindrique du pion. Les chiffres montrent qu'à une combinaison d'une vitesse de 1400 tr/min et pour une forme de pion conique la puissance électrique consommée dépasse 4500 Watt.

Par ailleurs l'effet de la forme de l'outil (F) est plus intense quand la fréquence de rotation est élevée (1400 tr/min) contrairement lorsque fréquence de rotation est faible (710 tr/min). D'où l'importance de l'interaction  $N \cdot F$  dans le modèle de régression (Tableau.III.5).



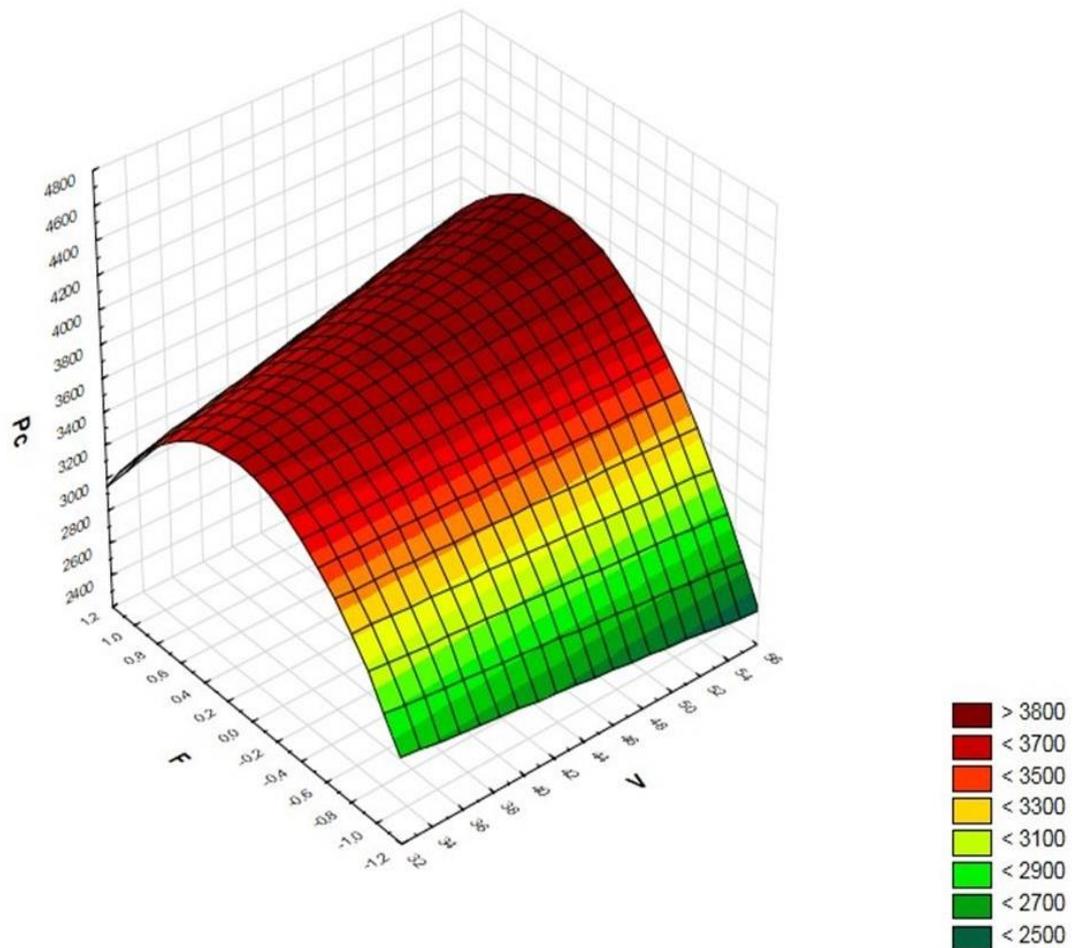
**Figure III-11 :** Surface de réponse de la puissance électrique consommée en fonction de F et N.

La figure III-12 vient confirmer les courbes des effets moyens présentées précédemment, où on peut clairement constater l'effet très significatif de la fréquence de rotation par rapport à la vitesse de soudage. Cependant l'effet de cette dernière ( $V$ ) est plus important à fréquences de rotation élevées qu'à faibles fréquences de rotation de l'outil. D'où la grande importance de l'interaction  $N*V$  dans le modèle de régression (Tableau.III.5).



**Figure III-12 :** Surface de réponse de la puissance électrique consommée en fonction de  $V$  et  $N$ .

On voit sur la figure ci-dessous, que la puissance électrique consommée varie de manière non linéaire vis-à-vis la forme de l'outil. A propos de l'interaction  $V \cdot F$ , l'effet du facteur ( $F$ ) est presque le même quand la vitesse de soudage varie. D'où l'absence de cette interaction et l'importance élevée de l'interaction  $V \cdot F^2$  dans le modèle de régression (Tableau.III.5).



**Figure III-13 :** Surface de réponse de la puissance électrique consommée en fonction de  $V$  et  $F$ .

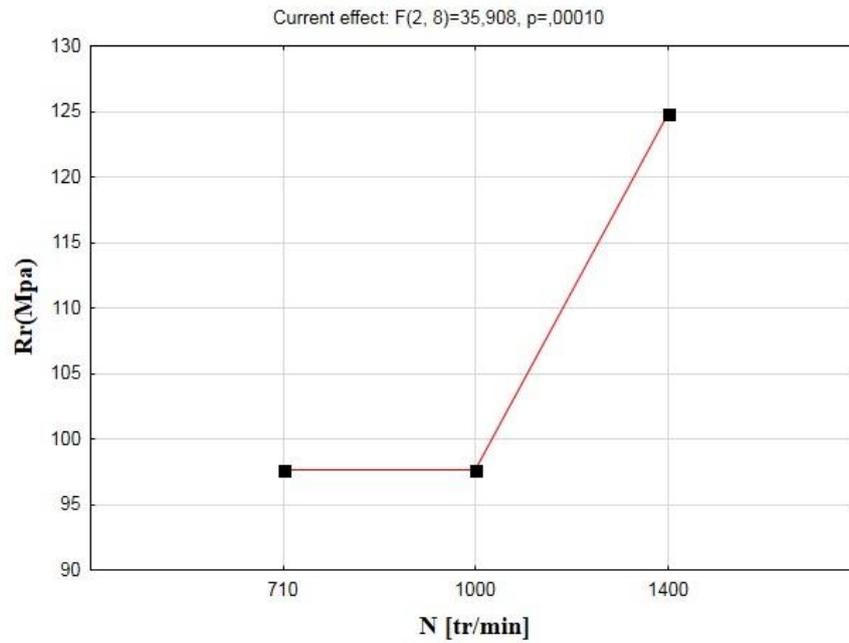
## III.7.2. La résistance à la rupture

Les coefficients des facteurs significatifs du modèle de surface de réponse sont donnés dans le tableau de régression ci-dessous. L'importance de chaque facteur dans le modèle est mise en évidence par le test de Student et le P-value. On peut voir que le facteur **N** est le plus significatif dans le modèle suivi de la moyenne et de l'interaction **N\*V**. Le coefficient de détermination ajusté du modèle est égal à **95.94 %**. Cela signifie que ce modèle a un excellent pouvoir prédictif de la résistance à la rupture du joint soudé.

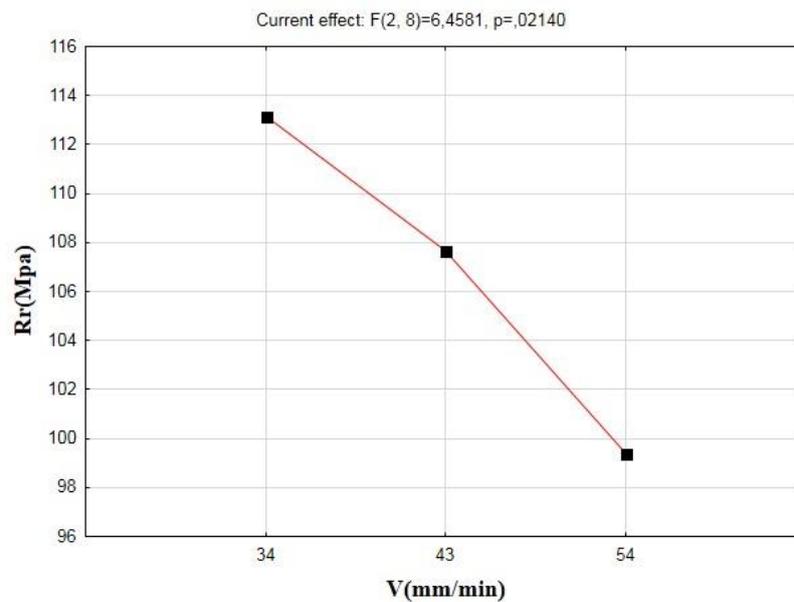
Tableau III-6: Régression linéaire (résistance de la rupture)

$R^2_{aju}=95,94$				
$F(8,6)=42,449$ $P<0,00010$ Erreur d'estimation : 3,2086				
Variable 15	Coefficient de modèle b	Erreur de coefficient de modèle b	Teste de student	P-vlue
moyenne	115,4060	27,71232	4,16443	<b>0,005915</b>
<b>N</b>	0,0001	0,00001	6,70584	<b>0,000534</b>
<b>NV</b>	-0,0015	0,00046	-3,17628	<b>0,019166</b>
VF	0,3759	0,16003	2,34908	0,57130
$F^2$	27,0580	10,06866	2,68735	<b>0,036180</b>
<b>N</b>	-0,1013	0,3716	-2,72526	<b>0,034402</b>
<b>V</b>	1,0176	0,51493	1,97620	0,095525
$VF^2$	-0.3933	0,22831	-1,72258	0,135739
<b>F</b>	-8,8300	7,05308	-1,25194	0,257184

La résistance à la rupture **R<sub>r</sub>** évolue de façon non monotone par rapport au facteur **N** et **F** (Fig.16-18) et de façon monotone décroissante avec **V** (Fig.17). Les facteurs le plus influents sur **R<sub>r</sub>** sont d'abord **N** avec un P-value égal à 0,01 % (risque d'effet réel nul) et ensuite **F** avec un P-value égal à 0,2 % (risque d'effet réel nul) et enfin la vitesse de soudage **V** avec un risque d'effet réel nul égal à 2.1 %. Les trois facteurs sont tous significatifs puisque leurs P-value sont inférieurs au niveau de confiance imposés **5 %**.

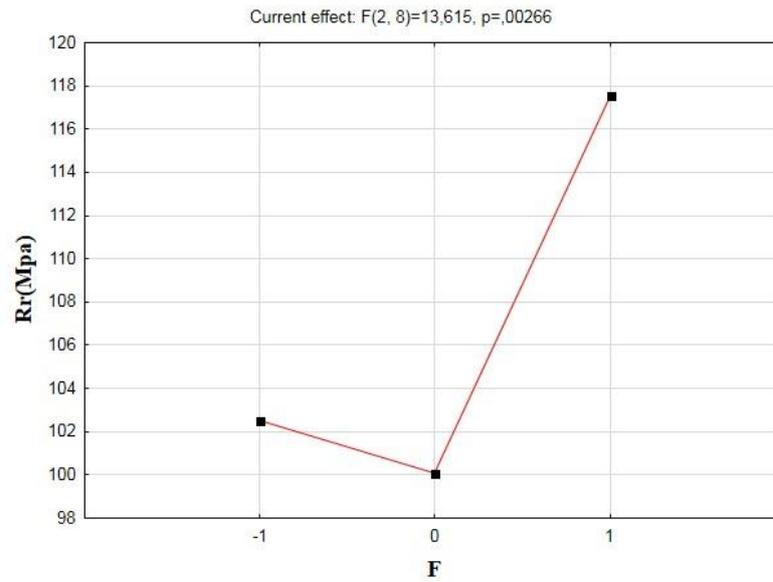


**Figure III-14 :** Effet moyen de la fréquence de rotation sur la résistance a la rupture



**Figure III-15 :** Effet moyen de la vitesse de soudage sur la vitesse de rotation.

La forme conique du pion (valeur codée 0) engendre une résistance minimale du joint soudé. La résistance maximale est obtenue avec une forme cylindrique fileté.



**Figure III-16 :** *Effet moyen de la forme du pion sur la résistance à la rupture.*

La Surface de réponse (Fig III-17) montre que la résistance est minimale lorsque  $N$  et  $F$  sont moyens. La résistance maximale est obtenue pour  $N$  maximale et une forme d'outil cylindrique fileté.

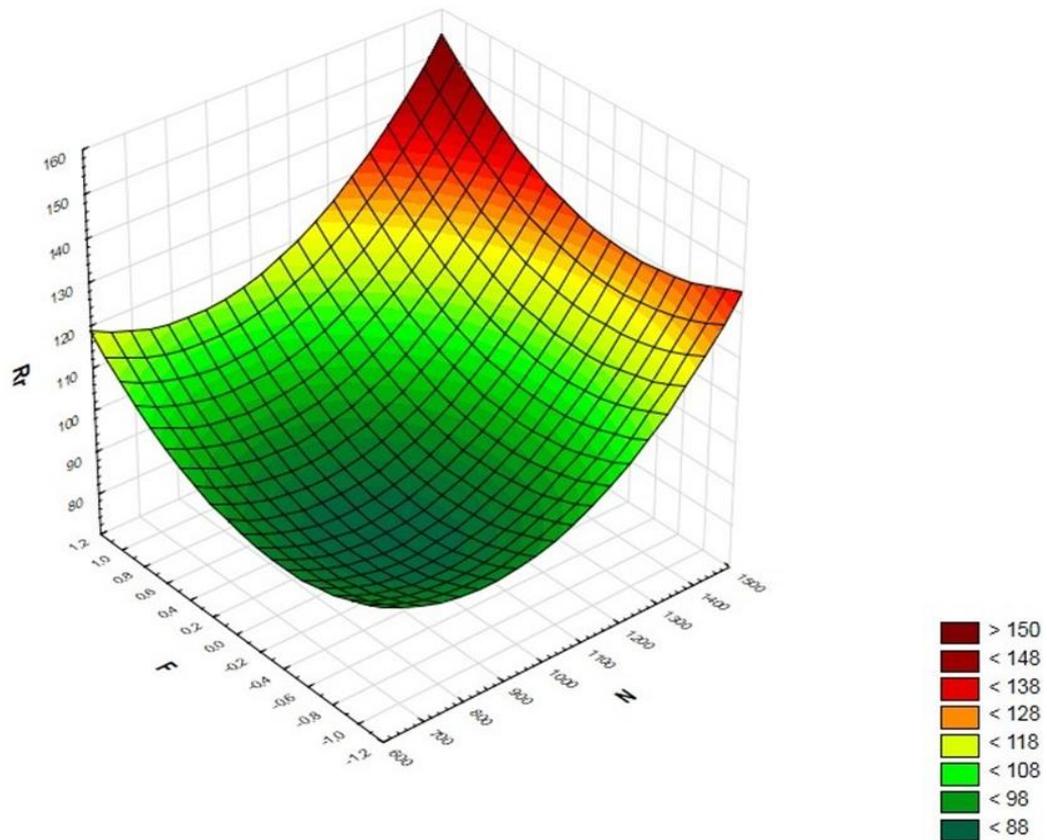
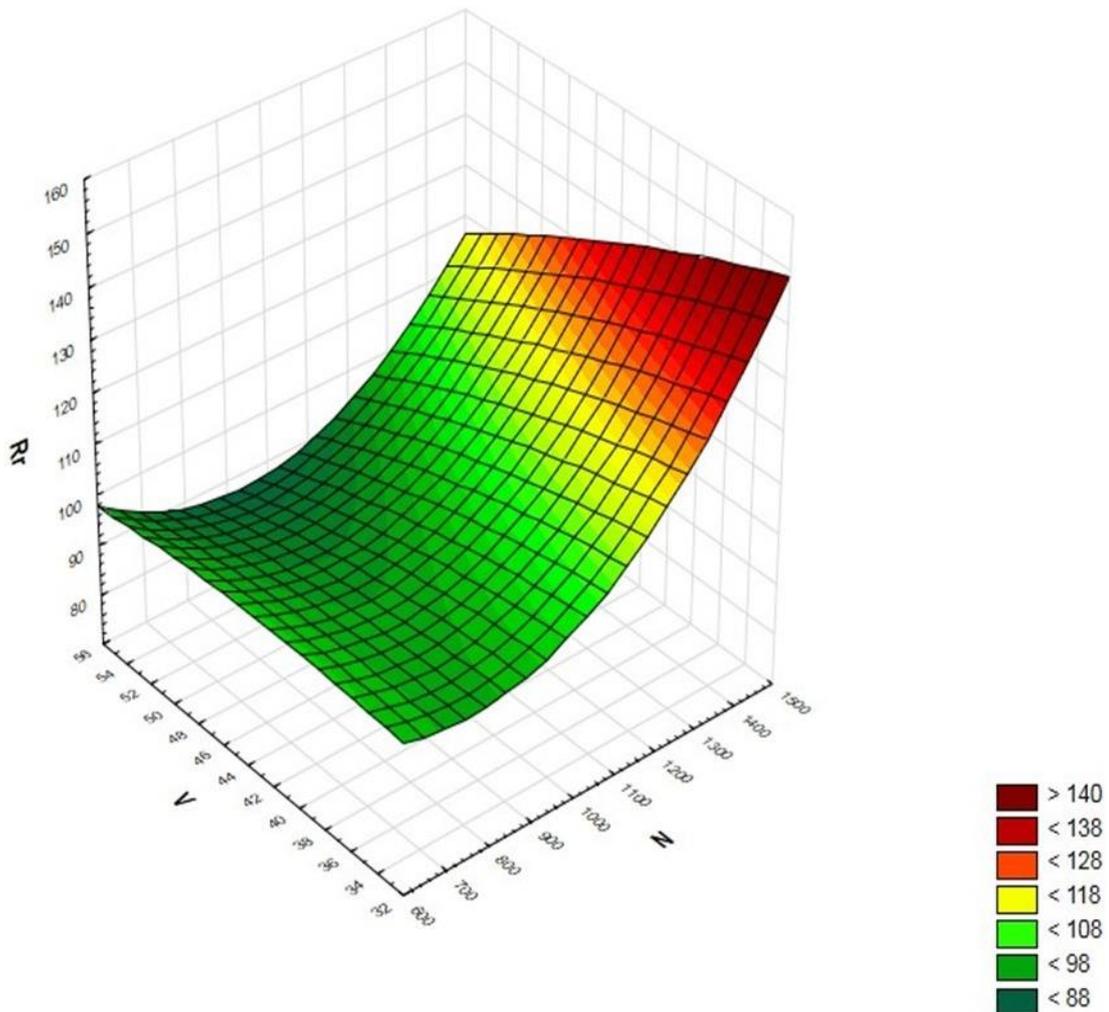


Figure III-17 : Surface de réponse de la résistance à la rupture en fonction de  $F$  et

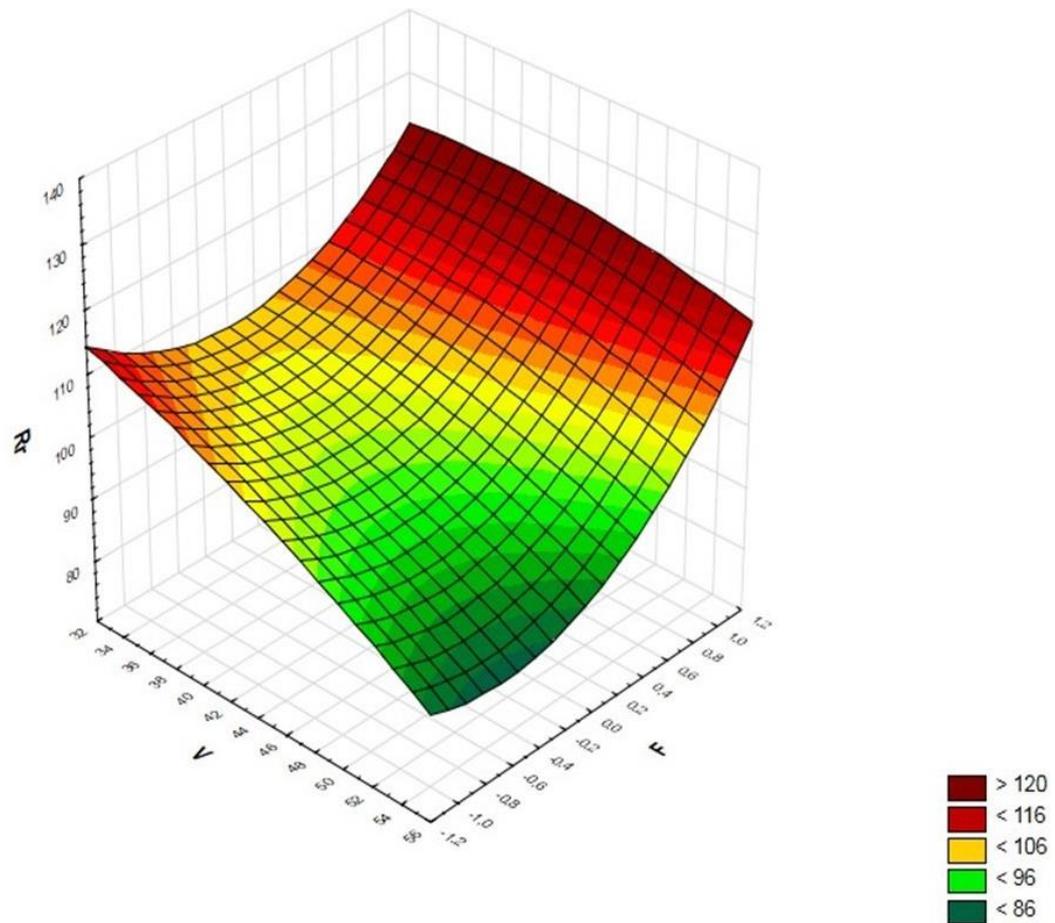
$N$ .

La figure III-18 vient confirmer les courbes des effets moyens présentées précédemment, où on peut clairement constater l'effet très significatif de  $N$  par rapport à  $V$ . Cependant l'effet de  $V$  est plus important à fréquences de rotation élevées qu'à faibles fréquences de rotation de l'outil. D'où la grande importance de l'interaction  $N*V$  dans le modèle de régression (Tableau.III.5). La résistance maximale est obtenue avec des fréquences de rotation élevées et vitesses de soudage faibles



**Figure III-18 :** Surface de réponse de la résistance à la rupture en fonction de  $V$  et  $N$ .

A propos de l'interaction  $V \cdot F$ , l'effet du facteur ( $F$ ) est plus significatif quand la vitesse de soudage est faible. Mais l'effet de cette interaction est non significatif dans le modèle de régression (Tableau.III.5).



**Figure III-19 :** Surface de réponse de la résistance a la rupture en fonction de V et F.

## **Conclusion**

Dans ce chapitre, on a présenté une étude expérimentale visant à modéliser les performances de soudage par friction-malaxage, à savoir ; la puissance électrique consommée lors du soudage et la résistance à la rupture du joint soudé, en fonction des paramètres de soudage (fréquence de rotation de l'outil, vitesse de soudage, forme de l'outil).

Une campagne d'essais basée sur un plan d'expérience Box\_Behnken, a été menée. La régression linéaire multiple a permis la construction de modèles mathématiques de prédiction. L'analyse de la variance a mis en exergue l'influence de chacun des paramètres de soudage sur les réponses étudiées.

Enfin nous recommandons l'utilisation de valeurs paramétriques suivantes (  $N=1400$  tr/ min,  $V= 34$ mm/min, pion cylindrique fileté) afin de maximiser la résistance à la rupture du joint à souder. Par contre, pour minimiser la puissance électrique lors de soudage, nous suggérons d'employer les valeurs paramétriques suivantes ( $N=710$  tr/min,  $v= 34$  mm/min, pion cylindrique).

# *Conclusion Générale*

## *Conclusion Générale*

---

Bien que la technique de soudage par friction et malaxage existait depuis plus d'une vingtaine d'années, plusieurs phénomènes sont encore mal compris tels que le choix des conditions opératoires, l'apparition de défauts dans les pièces soudées, vibrations ...etc. D'ailleurs, la plupart des études visant à améliorer les performances de ce procédé sont étudiés expérimentalement. Dans cette étude, une campagne d'expériences a été planifiée et une méthode de surface de réponse a été mise en œuvre en vue d'une modélisation et optimisation de la résistance à la rupture des joints soudés et de la puissance électrique consommée durant le soudage par friction et malaxage de l'alliage d'aluminium AA6061. La fréquence de rotation, la vitesse de soudage et la forme de l'outil, entre autres, ont été sélectionnées en tant que paramètres de soudage maîtrisables.

L'analyse statistique des données d'expérimentation par l'ANOVA a permis d'identifier les paramètres de soudage influents sur les réponses étudiées. En effet, la résistance à la rupture du joint est affectée par la fréquence de rotation de l'outil et la forme du pion. Par ailleurs, la puissance électrique consommée est sensible aux variations des trois paramètres de soudage mais beaucoup plus à la fréquence de rotation de l'outil. La régression linéaires multiple a permis le développement de modèles fiables de type RSM pour la résistance à la rupture du joint et la puissance électrique consommée. Des surfaces de réponse ont été tracées dans le but de comprendre l'évolution des performances citées en fonction des paramètres de soudage.

Les paramètres de soudage considérés ont été optimisés. En effet, en vue de maximiser la résistance à la rupture de l'alliage AA6061, nous recommandons les conditions de soudage suivantes :

- Fréquence de rotation de l'outil :1400 tr/min
- Vitesse de soudage : 34 mm/min
- Forme cylindrique fileté du pion

Dans le but de minimiser la puissance électrique consommée, nous recommandons les conditions de soudage suivantes :

- Fréquence de rotation de l'outil :710 tr/min
- Vitesse de soudage : 34 mm/min
- Forme cylindrique du pion

## *Conclusion Générale*

---

Dès le début de l'étude. Une recherche bibliographique s'est avérée nécessaire afin de tracer les contours de l'étude et d'apprécier sa faisabilité au regard des objectifs fixés. Ce mémoire nous a permis l'étude de comportement mécanique des plaques soudées par friction-malaxage de l'alliage de l'aluminium. Ce qui nous a permis de définir quelques paramètres de soudage qui influent en FSW (vitesse d'avance de la table et la fréquence de rotation de la broche, la pression de soudage) et de déterminer quelque avantage et inconvénient de se procédé. Parmi les avantages que nous avons soulevés dans notre travail, on peut citer ;

- La rapidité et facilité de mise en œuvre comparée au procédé de soudage à l'arc,
- L'absence de métaux d'apport et donc moins de préparatifs
- Ecologique et sûre vue l'absence de gaz et de fumées.

Et comme toute étude scientifique, nous avons fait face à quelques entraves tels que ;

- Soudure incomplète entre les deux pièces,
- Apparition de défauts superficiels causés par les défauts de planéité,
- Glissement des plaques lors du soudage par manque de serrage,
- Collision entre le pion et le support plaques,
- Efforts de soudage axial difficilement maîtrisable,

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

## *Liste bibliographie*

## *Liste bibliographie*

---

- [1] G. S. F. RAGUSA, H. ANTZ, manuel de technologie mécanique. DUNOD Paris, 2006.
- [2] A. Guglielmetti, « « Etude numérique du soudage par impulsion magnétique », thèse doctorat de l'université de technologie de Compiègne de Québec à Chicoutimi, 2012.
- [3] MATHIEU. T., « Etude du comportement mécanique à chaud de l'acier P91 vers la compréhension des mécanismes intra / inter granulaires sur la tenue en fluage : application aux structures soudées », thèse de doctorat, l'école nationale supérieure des mines de paris, 2012.
- [4] R. B., Métallurgie et mécanique du soudage, Edition LAVOISIER, PARIS.
- [5] M. B., « Etude les défauts de soudage des pipelines », thèse de master, Université Mohamed Khider-Biskra, 2012.
- [6] R. B., Métallurgie et mécanique du soudage, Edition LAVOISIER. PARIS.
- [7] <https://www.orexad.com/soudage-tig>. consulté le 22/06/2022.
- [8] Influence du flux de soudage sur la qualité de la soudure des Pipelines, Université Badji Mokhtar De Annaba, 2017. [En ligne]. Disponible sur: mémoire de doctorat 3ème cycle (LMD),
- [9] Z. GUITOUN, « Caractérisation mécanique d'un assemblage à clin en acier inoxydable soudé par le procédé MAG », mémoire de master, université Abou BekrBelkaid – Tlemcen, 2018.
- [10] M. ABDELLATIF, « Etude comparative des différents procédés de soudage sur l'effet de fissuration à froid dans la ZAT », mémoire de master, université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen, 2018.
- [11] soudage saw – UU Recherche Google. [https://www.google.com/search?q=soudage+saw&rlz=1C1CHBD\\_frDZ853DZ853&sxsrf=ALiCzsYmeQ2E6EtmbMkIVkY5ivty5tfYjg:1654028632588&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjFs9\\_oyIr4AhVK7rsIHQlxCVkQ\\_AUoAXoECAIQAw&biw=1366&bih=568&dpr=1](https://www.google.com/search?q=soudage+saw&rlz=1C1CHBD_frDZ853DZ853&sxsrf=ALiCzsYmeQ2E6EtmbMkIVkY5ivty5tfYjg:1654028632588&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjFs9_oyIr4AhVK7rsIHQlxCVkQ_AUoAXoECAIQAw&biw=1366&bih=568&dpr=1) (consulté le 31 mai 2022).

## *Liste bibliographique*

---

- [12] Thèse De Assaf Farah : Comportement En Fatigue De Joints D'aluminium 7075-T6 Soudés Par Friction-Malaxage Et Parachevés, Université De Montréal, 2013.
- [13] Www.CSC.Dz Brevets D'invention De Mouloud Aissani Et Saliha Gachi Outil De Soudage Par Friction Malaxage (FSW).
- [14] Institut De Recherche Appliquée En Productique, Contour Antoine De St Exupery Campus De Ker Lann 35170 Bruz (Bulletin Technique) 8 octobre 2007.
- [15] Thèse D'Olivier Lorrain : Analyses Expérimentale Et Numérique Du Procédé De Soudage Par Friction Malaxage FSW, Paris Tech École Doctorale, 2010.
- [16] Université De Montréal École Polytechnique De Montréal Diplôme De Maîtrise Es Sciences Appliquées De Brès Antoine : Modélisation Et Simulation Du Soudage Par Friction Malaxage Utilisant Des Robots Industriels.
- [17] H. Badarinarayan, F. Hunt, K. Okamoto, Chapter 12: Friction Stir Spot Welding, Friction Stir welding and Processing, Edité par R.S. Mishra ET M.W. Mahoney, ISBN-13 978-0- 87170-840-3, ASM International,. 2007.
- [18] Kallee S W, 'Friction Stir Welders Provide Prefabricated Components and Panels'. Aluminium International. 2004.
- [19] D. Macel, 'Exemples De Travaux En Brasage : Essais Mécaniques Et Métallographies', (Institut De Soudure) 1601\_0232\_P\_041\_047- 41.
- [20] RA; Murr, LE; Shindo, DJ; Soto, HF. Tool wear in the friction stir welding of aluminium alloy 6061+20% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: A preliminary study. Scripta Materialia 45: 75–80. Doi: 10.1016/ S1359- 6462(01)00994-0.
- [21] Cook G.E., Smartt H.B., Mitchell J.E., Strauss A.M., Crawford R., Controlling robotic friction stir welding, Welding Journal, Vol. 82 No.6, pp.28-34, 2003.
- [22] R.S. Mishra, Z.Y. Ma. Friction stir welding and processing. Materials Science and Engineering, 50, 1-78,.
- [23] Thèse D'Amèvi Tongne : Étude Expérimentale Et Numérique Du Soudage Fsw (Friction Stir Welding) : Analyse Microstructurale Et Modélisation Thermomécanique Des

## *Liste bibliographique*

---

Conditions De Contact Outil/Matière Transitoires, A Saint-Etienne.

[24] MÉMOIRE De Frédéric Thibeault : Étude Numérique Et Expérimentale Du Soudage Par Friction Malaxage, Université Du Québec A Chicoutimi.

[25] Dainelli@Institutdesoudure.Com, Evaluation Des Possibilités De Contrôle Qualité EnLigne Des Soudures Fsw.

[26] Norme Soumis A Enquête Probatoire, 'Defines Friction Stir Welding Terms'. In ISO 25239-1, 2011.

[27] W. J. Arbegast, 'Mechanisms of flow related defects in FSW welds', Proceedings 6th FSW Symposium, Brazil, 2007.

[28] Romain Boulandet<sup>1</sup>, Hervé Lissek<sup>1</sup>, Optimisation d'un absorbeur électroacoustique par plans d'expériences: approche expérimentale et numérique<sup>1</sup> LÉMA, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, CH-1015.13 avril 2010.

[29] Wolbert, Dominique Merabet, SmailBouzaza, Abdelkrim Bouhelassa, Mohamed, Modélisation et optimisation de la photodégradation du 4-méthylphénol dans un réacteur à Recirculation en présence d'UV/ZnO, Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE) 2009.

[30] Jacques GOUPY, LES PLANS D'EXPERIENCES© Revue MODULAD, 2006

[31] Hicham CHIBANE, soutenue le : 05 avril 2013, Contribution à l'optimisation multi objectif des paramètres de coupe en usinage et apport de l'analyse vibratoire Application aux matériaux métalliques et composite

[32] Pierre DUSART Cours de Statistiques inférentielles Licence 2-S4 SI-MASS Année 2018

[33] Dreesbeke, J.J, FINE, J. et Saporta, G. (1997). Plans d'expériences : applications en entreprise [7e Journées d'étude en statistique, 1996, Marseille], l'Association pour la statistique et ses utilisations et la Société statistique de France ; Paris : Éd. Technip, ISBN : 2 - 7108-0733-

## *Liste bibliographie*

---

[34] Y. Dodge, *Statistique Dictionnaire encyclopédique*, Springer-Verlag France, Paris, 2007

[35] Charif, *Elaboration des corrélations quantitatives structure-activité des acides carbonés. Etude théorique des effets de solvants sur les équilibres libres cétoénoliques des composés bdicarbonyles cycliques*, Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, 2012.

# *Tables des matières*

**Remerciements**

**Dédicace**

**Dédicace**

**Sommaire**

Les d'abréviation

Les acronymes

Liste des tableaux

Liste des figures

**Introduction Générale..... 1**

***Chapitre I***

***Généralités sur le soudage***

Introduction .....	4
I.1. Définition de l'Assemblage .....	4
I.2. Les types d'assemblage.....	5
I.2.1. Assemblage permanent.....	5
I.2.2. Assemblage démontable.....	5
I.2.3. Assemblage direct .....	6
I.2.4. Assemblage indirect .....	6
I.3. Définition assemblage par soudage.....	7
I.4. Les procède de soudage .....	7
I.4.1. Soudage à l'arc .....	8
I.4.2. Le procède Soudage par friction .....	13
Conclusion.....	14

***Chapitre II***

***Etat de l'art sur le procédé FSW et la modélisation expérimentale***

Introduction .....	16
II.1. Procède FSW .....	16
II.2. Principes de FSW.....	16
II.2.1. Soudage linéaire (FSW).....	20
II.2.1.1. Phase d'approche et de pénétration .....	21
II.2.1.2. Phase de soudage .....	21

## *Table des matières*

---

II.2.1.3. Phase de retrait de l’outil .....	22
II.2.2. Soudage par point par friction malaxage (FSSW) .....	22
II.3. Domain d’applications .....	23
II.3.1. Applications actuelles .....	23
II.3.1.1. Construction navale .....	23
II.3.1.2. Construction aéronautique .....	24
II.3.1.3. Construction ferroviaire .....	24
II.3.1.4. Construction automobile.....	25
II.3.2. Domaines futurs .....	25
II.3.2.1. Marine.....	25
II.3.2.2. Aéronautique.....	26
II.3.2.3. Chemins de fer.....	26
II.3.2.4. Automobile .....	26
II.4. Les avantages et les inconvénients du procédé de soudage(FSW) .....	26
II.4.1. Avantages de (FSW) .....	26
II.4.2. Les inconvénients de (FSW) .....	27
II.5. Paramètres du soudage par friction malaxage.....	27
II.6. Les défauts génèrent par le malaxage .....	28
II.7. La méthode des surfaces de réponses (RSM) .....	30
II.7.1. Modélisation de la méthode .....	30
II.8. Plans d’expériences.....	32
II.8.1. Définition .....	32
II.8.2. Notion d'espace expérimental .....	32
II.8.2.1. Notion de surface de réponse.....	33
II.8.2.2. Construction de la méthodologie de surface de réponse.....	34
II.8.2.3. Validation du modèle.....	35
II.9. Les plans pour surfaces de réponses .....	36
II.9.1. Les plans composites centraux.....	37
II.9.2. Les plans de Doehler.....	38
II.9.3. Les plans de Box-Behnken .....	39
II.10. Analyse de la variance (ANOVA) .....	40
II.10.1. La variance .....	40
II.10.2. Hypothèses fondamentales .....	41
II.10.3. Hypothèses à tester .....	41

## *Table des matières*

---

II.11. Teste de fisher–Snedecor (F) .....	41
II.12. Analyse de la variance du modèle .....	41
II.12.1. Le modèle observé .....	42
II.12.2. Les nombres de degrés de liberté .....	42
II.12.3. L'équation de l'analyse de la variance .....	42
II.12.4. Analyse de la variance résiduelle .....	44
II.13. Régression linéaire multiple .....	44
II.13.1. Description de la méthode .....	44
Conclusion .....	46

### *Chapitre III*

#### *Modélisation expérimental du FSW*

Introduction .....	48
III.1. Procédure expérimental .....	48
III.1.1. Variables d'entrées .....	49
III.1.2. Variables de sorties .....	49
III.2. Conception des outils FSW .....	49
III.3. Plan d'expérience .....	50
III.4. La puissance électrique consommée .....	52
III.5. Résistance à la rupture .....	53
III.6. Résultats et discussions .....	54
III.7. La régression linéaire et l'analyse de la variance (ANOVA) .....	54
III.7.1. La puissance électrique consommée .....	54
III.7.2. La résistance à la rupture .....	60
Conclusion .....	66
<b>Conclusion Générale .....</b>	<b>67</b>
<b>Liste bibliographie .....</b>	<b>70</b>
<b>Tables des matières .....</b>	<b>75</b>

## *Résumé*

De nos jours, le soudage par friction-malaxage des matériaux de différentes nuances prend une place prépondérante parmi les techniques d'assemblage. Néanmoins, la réalisation de soudure de qualité rime souvent et forcément avec une consommation élevée de l'énergie. Par conséquent, ce travail se veut d'optimiser les conditions de soudage, à savoir: la vitesse de soudage, la fréquence de rotation et la forme de l'outil, en vue de maximiser la résistance à la rupture des joints soudés et de minimiser la puissance électrique consommée lors de l'opération de soudage d'alliage en aluminium (AA6061). Pour se faire, une campagne d'essais a été réalisée selon un plan d'expérience de Box-Behnken et deux modèles mathématiques très fiables de type surface de réponse (RSM), qui relient les objectifs cités aux paramètres de soudage, ont été développés par régression linéaire multiple. L'analyse de la variance (ANOVA) des données expérimentales a mis en évidence l'effet de chacun des paramètres de soudage sur les réponses étudiées. L'optimisation par surface de réponse a permis la sélection des conditions de soudage optimales, maximisant la résistance à la rupture ou minimisant la puissance électrique consommée.

**Mots clés :** soudage par friction- malaxage, plan d'expérience, modélisation optimisation, ANOVA.

## *Abstract*

Nowadays, friction stir welding of materials of different grades is becoming a major part of joining techniques. Place among the assembly techniques. Nevertheless, the realization of quality welds often nevertheless, the realization of high quality welds often and necessarily rhymes with a high energy consumption. Therefore, this work work is to optimize the welding conditions, i.e. welding speed, rotation frequency and and the shape of the tool, in order to maximize the breaking strength of the welded joints and to minimize the minimize the electrical power consumed during the welding operation of aluminium alloys (AA6061). To do so, a test campaign was carried out according to a Box-Behnken design of experiment and two very reliable mathematical models of the response surface type (RSM), which link the mentioned objectives to the welding parameters. Objectives to the welding parameters, were developed by multiple linear regression. The analysis of variance (ANOVA) of the experimental data showed the effect of each of the welding parameters of the welding parameters on the studied responses. The optimization by response surface allowed the selection of the optimal welding conditions, maximizing the resistance to breakage or minimizing the electrical power consumed. Translated with [www.DeepL.com/Translator](http://www.DeepL.com/Translator) (free version)

**Keywords:** friction stir welding, experimental design, optimization modelling, ANOVA.