

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

MEMOIRE

PRÉSENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE

MASTER

FILIÈRE : GÉNIE MÉCANIQUE

SPÉCIALITÉ : FABRICATION MÉCANIQUE ET PRODUCTIQUE

PAR :

BENABDELHAK MADINE

YEKKEN RIAD

Thème

**Optimisation Multi-Objectifs des Paramètres de Soudage
par Friction et malaxage FSW**

Soutenu le 02/07/2018 devant le jury composé de:

Melle. Himed

Présidente

Mr. M. Akli Sahali

Rapporteur

Mr. Amari

Examineur

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2017-2018

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions le Dieu, notre créateur de nos avoir donné les forces pour accomplir ce travail.

Nous adressons le grand remerciement à notre encadreur Mr. SAHALI qui a proposé le thème de ce mémoire, pour ses conseil et ses dirigés

Aussi, Nous voulons également remercier (Mr, Mme) pour nous avoir fait l'honneur de présider le jury de notre mémoire.

Nous avons le grand honneur que le chef de département Mr. BENSLIMANE.

Nous remercions Mr..... et Mme..... avoir faire de lecteur notre mémoire et aller l'examiner et ils peuvent évaluer ce travail.

Finalement, à tous les enseignants de l'université ABDELRAHMANE MIRA TARGA OUZAMOUR BEJAIA.

Dédicaces

*Je tiens à dédier le fruit de ce travail acharné et modeste à mes parents. À mes frères, et mes sœurs. À mes amis et spécialement **FAICEL. SLIM. WALID. ABDERREZAK. SONIA. AHMED** et spécifiquement à ma fleur **ZAZA**. Je dédier ce travail à tous les **MOUJAHIDINS** de la révolution nationale, et à l'esprit de nos **MARTYRS** sur la cause amazigh, en particulier à l'esprit du notre rebelle, et le symbole de la lutte pour la culture amazigh et la justice pour les droits de l'homme **MATOUB LOUNES**.*

« Il est nécessaire de garder espoir, afin que vous puissiez croire en votre cœur, même si les promesses sont trompeuses. »

-Matoub Lounes-

« Toute la neige fond entre les mains »

-Ait Menguellet-

MADINE

Liste des figures

Liste des figures

<i>Figure I.1 : Soudage sans pression</i>	6
<i>Figure I.2 : Soudage avec pression</i>	7
<i>Figure I.3 : Machines de soudage FSW de l'institut de soudure</i>	10
<i>Figure I.4 : Illustration du procédé de soudage par friction et malaxage</i>	10
<i>Figure I.5 : Exemple de géométrie d'outil</i>	11
<i>Figure I.6 : Formation de la soudure</i>	12
<i>Figure I.7 : (a) – Fin de phase de pénétration, (b) – Phase de chauffage</i>	13
<i>Figure I.8 : (a) – Phase de translation, (b) – Trou à la fin de soudure</i>	13
<i>Figure I.9 : Comparaison de la distorsion entre le soudage FSW et le soudage à l'arc</i>	14
<i>Figure I.10 : Transferts thermiques par le procédé FSW</i>	15
<i>Figure I.11 : Coupe d'une soudure sur un alliage d'aluminium</i>	16
<i>Figure I.12 : Les différentes configurations de soudage effectuées par FSW</i>	20
<i>Figure II. 1 : Le processus de modélisation</i>	26
<i>Figure II.2 : Illustration du principe de soudage par friction</i>	29
<i>Figure II.3 : Type classique d'outil du TWT</i>	31
<i>Figure II.4 : Différentes géométries d'épaulement</i>	32
<i>Figure II.5 : Positionnement de l'outil</i>	34
<i>Figure II.6 : Choix de la zone de contact entre l'outil et la matière</i>	35
<i>Figure II.7 : Trajectoire du point le plus bas et profil des stries surface supérieur du joint</i>	36
<i>Figure II.8 : Les différentes zones du cordon</i>	38
<i>Figure II.9 : Limites des zones</i>	39
<i>Figure III. 1 : Principe général d'un algorithme génétique</i>	62
<i>Figure IV.1 : Front de Pareto des solutions non dominées</i>	68
<i>Figure IV.2 : Les solutions non dominée du front de Pareto dans l'espace de recherche faisable</i>	69
<i>Figure IV.3 : Les solutions non dominée du front du Pareto</i>	71
<i>Figure IV. 4 : Les solutions non dominée du front du Pareto</i>	73

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Principaux procédé du soudage	9
Tableau II.1 : Différents types de modèles.....	27
Tableau II.2 : Types de défauts présents au niveau d'un joint FSW.	33
Tableau II.3 : Équations de variation des propriétés en fonction de la température	40
Tableau IV.1 : Valeurs des coefficients et constantes utilisées	67
Tableau IV.2 : Les solutions et paramètres optimaux	69
Tableau IV.3 : Valeurs des coefficients et constantes utilisées	70
Tableau IV.4 : Les solutions et paramètres optimaux	71

Liste des abréviations

Liste des Abréviations

FSW : Friction Stir Welding

OXW : Soudage oxyacétylénique

S M AW : Soudage à l'arc à l'électrode enrobée

S AW : Soudage à l'arc submergé

G M AW : Soudage sous protection gazeuse actif à électrode fusible MAG

G M AW : Soudage sous protection gazeuse inerte à électrode fusible MIG

F C AW : Soudage fil fourré sans gaz

G TAW : Soudage sous protection gazeuse à électrode réfractaire (TIG)

PAW : Soudage plasma

RSW : Soudage par résistance par point

FSW : Soudage par friction-malaxage

EBW: Soudage par faisceau d'électrodes

C.A.S.P.R : Coefficient d'Aptitude au Soudage par Résistance

MO : matrice orthogonale

DLT : degré de liberté total

EQM : écart quadratique moyen

MSR : méthodologie de surface de réponse

ZAT : La zone affectée thermiquement

Liste des abréviations

Liste des Notation

Liste des Notations

ε_0 : sont des paramètres du matériau

σ : le Coefficient de glissement

$\dot{\varepsilon}_0$: Constante du matériau s^{-1}

$\dot{\varepsilon}_e$ Taux de déformation effectif (s^{-1})

ε_e : Déformation effective (m/m)

T_t : représente la température au temps t(s)

T_∞ : la température du milieu ambiant (K)

T_F : est la température de fusion du métal

T_p, T_ε : temps du soudage durant l'opération (pénétration, échauffement) (min)

T_{Dv} : durée de vie de l'outil avant l'opération (min)

T_{ch} : temps pour changer l'outil inutile (min)

T_{ex} : temps d'exécution (min)

T_o : temps de mise en course pour l'opération (min)

T_s : temps du soudage unitaire (min)

K : Nombre de tours faits par l'outil sur une distance (x mm)

V_a, N : vitesse d'avance (mm/min) et vitesse de rotation (tr/min)

lp : longueur du pion

Ff : la force de friction

μ : le coefficient de friction,

P_n : la force normale

q : est la chaleur produite

H : hauteur du volume à souder (zone de malaxage) (mm)

L : longueur du volume à souder (zone de malaxage) (mm)

D : diamètre d'épaulement (mm)

α : l'angle d'inclinaison (mm)

Liste des Notation

- n : nombre de plaques (pièces) à souder
- d : diamètre du pion (mm)
- R : longueur de joint (mm)
- w : largeur de joint (mm)
- S : décalage d'outil
- h : dureté de l'outil
- C_A : Coût d'aiguisage de l'outil(\$)
- C_{Hr}, C_{Hf} : Coût horaire de l'outil (\$/min)
- C_{pr} : Coût d'achat de l'outil (\$/outil)
- C_B : Coût du matériel brut (\$)
- k_o : Coût d'opération, incluant salaire et machine (\$/min)
- R_e : la limite élastique (MPa)
- R_m : la résistance à la rupture (MPa)
- R_t : Résistance à la traction (MPa)
- A : L'allongement (%)
- D_m : La dureté minimale (HV)
- D_s : Dureté de la pépite de soudure (HV)
- T_c : Taux de corrosion (mm/an)
- Q : Classe de qualité de la soudure

Sommaire

Sommaire

Remerciements

Dédicaces

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Liste des notations

Résumé

Introduction générale 1

Chapitre I : GENERALITES SUR LE PROCEDE DE SOUDAGE

Introduction 3

I.1. Généralités sur le soudage 4

I.1.1. Définition de soudage 4

I.1.2. Définitions et classification des procédés de soudage 4

I.1.3. Procédé de soudage 7

I.1.4. Principaux procédés du soudage 9

I.2. Soudage par friction (malaxage) 9

I.2.1. Procédé de soudage par friction et malaxage 9

I.2.2. Phénomènes physiques observés dans le procédé 14

I.2.2.1. Mécanique 14

I.2.2.2. Thermique 14

I.2.2.3. Métallurgie 15

I.2.3. Paramètres du procédé 16

I.2.3.1. Vitesse de rotation et vitesse d'avance 16

I.2.3.2. Angle d'inclinaison de l'outil 17

I.2.3.3. Efforts appliqués	17
I.2.3.4. Avantages et limitations du procédé FSW	18
I.2.3.5. Mise en œuvre du procédé	20
Conclusion	22

Chapitre II : MODELISATION DU PROCEDE DE SOUDAGE PAR FRICTION ET MALAXAGE

Introduction	23
II.1. Modélisation	23
II.1.1. Qu'est ce qu'un modèle ?	23
II.1.2. Définition du phénomène	24
II.1.3. Divers modèles	26
II.1.3.1. Caractérisation d'un système dans une optique de modélisation	26
II.1.3.2. Les modèles analytiques	27
II.1.3.3. La différence entre modèle analytique et numérique	28
II.1.3.4. Les modèles empiriques	28
II.2. Les paramètres du soudage par friction	29
II.2.1. Les paramètres déterminants du soudage par friction et malaxage	29
II.2.2. Lien entre vitesse de rotation et vitesse de soudage	29
II.2.3. Lien entre la vitesse de rotation et la vitesse d'avance	30
II.2.4. Lien entre la vitesse de rotation et l'épaulement f_q	32
II.3. Les performances	32
II.3.1. Les défauts dans un cordon FSW	32
II.3.2. Tentative d'éliminations des défauts	33
II.3.3. Lien entre les paramètres de l'outil et l'angle d'inclinaison α	34
II.3.4. La vibration de l'outil	35
II.3.4.1. Influence de la vitesse de rotation N (tr/min)	36

II.3.4.2. Influence de la vitesse d'avance V_a (mm/min)	37
II.3.4.3. Influence de l'effort de forgeage $F(N)$	37
II.3.5. Les différentes zones du cordon et microstructure	37
II.3.5.1. La Zone Affectée Thermiquement (ZAT)	37
II.3.5.2. Le cordon	38
II.3.5.3. Température de soudage	39
II.3.5.4. Modèle de comportement	40
II.3.5.5. Modèle de friction	41
II.3.5.6. Modèle de génération de chaleur	41
II.4. Méthodes de modélisation	42
II.4.1. Méthode Taguchi multi-objectif	42
II.4.1.1. Développement d'un modèle mathématique	42
II.4.2. Méthodologie de surface de réponse	44
II.4.2.1. Développement d'un modèle mathématique	44
II.5. Le coût et le temps	45
II.5.1. Temps du soudage unitaire	45
II.5.2. Coût du soudage	46
Conclusion	47

Chapitre III : METHODES ET MODELES D'OPTIMISATION

Introduction	48
III.1. Optimisation	49
III.1.1. Optimisation mono-objectif	49
III.1.1.1. Définition	49
III.1.1.2. Optimisation des systèmes linéaire	50
III.1.1.3. Optimisation des systèmes non linéaires	51
III.1.1.4. Techniques d'optimisation mono -objectif	51
III.1.2. Optimisation multi-objectif	53

III.1.2.1. Définition	53
III.1.2.2. Méthodes d'optimisation multi-objective	54
III.2. L'algorithme génétique	55
III.2.1. Définition	55
III.2.2. Codage d'individus	56
III.2.3. Opérateurs génétiques	56
III.2.3.1. Mutation	57
III.2.4. Du codage binaire au codage réel	57
III.2.4.1. Sélection	57
III.2.4.2. Reproduction (croisement)	57
III.2.3. Croisement entre bits	58
III.2.3.1. Mutation	58
III.2.4. Croisement entre paramètres	59
III.2.4.1. Mutation codée réelle	59
III.2.5. Implantation de l'algorithme génétique	59
III.2.5.1. Population initiale	60
III.2.5.2. Reproduction	60
III.3. Les modèles d'optimisation	62
Conclusion	65

Chapitre IV : ETUDE DE CAS

Introduction	66
IV.1. Cas d'optimisation deux-objectifs avec contraintes	66
IV.1.1. Modèles d'optimisation retenus	66
IV.1.2. Formulation du problème	67
IV.1.3. Données numérique	67
IV.1.4. Résultats et discussions	68

IV.2. Cas d'optimisation multi-objectifs sans contraintes	70
IV.2.1. Modèles d'optimisation retenus	70
IV.2.2. Formulation du problème	70
IV.2.3. Données numérique	70
IV.2.4. Résultats et discussions	71
Conclusion	73
Conclusion générale	74
Références bibliographiques	
Annexes	

Résumé

Dans ce travail nous avons étudié les effets des paramètres de soudage à savoir ; l'effort exercé sur le pignon, la fréquence de rotation et la vitesse d'avance de l'outil, sur les performances de soudage d'un alliage d'aluminium (AA6061T6), dans le but de déterminer les conditions opératoires conduisant à une qualité, résistance mécanique ainsi qu'une dureté optimales du joint de soudure. Pour ce faire, nous avons recensé à travers une recherche bibliographique approfondie divers modèles empiriques, issus de campagnes d'expériences, reliant les variables de décisions aux performances de soudage citées précédemment. Puis, nous avons formulé mathématiquement deux problèmes d'optimisation multi-objectifs avec et sans contrainte.

Le premier vise à maximiser la qualité et la résistance mécanique sous limitation d'une dureté maximale du joint de soudure.

Dans le second, nous cherchons à minimiser la dureté, maximiser la qualité et la résistance mécanique des pièces assemblées. Grâce à l'algorithme génétique NSGA II, nous avons résolu les deux problèmes d'optimisation et pu obtenir les variables de décision optimales.

Summary

In this work we want to study the effects of welding parameters namely; the force exerted on the pinion, the rotation frequency and the speed of advance of the tool, on the welding performance of an aluminum alloy (AA6061T6), in order to determine the operating conditions leading to an optimum quality, strength and hardness of the weld joint. To do this, we have identified, through a thorough bibliographic research, various empirical models, derived from experiences, linking the decision variables to the welding performance mentioned above. Then, we mathematically formulated two multi-objective optimization problems. with and without constraint. The first aims to maximize the quality and mechanical strength under limitation of a maximum hardness of the weld joint. In the second, we seek to minimize the hardness, maximize the quality and mechanical strength of assembled parts. Thanks to the NSGA II genetic algorithm, we solved both optimization problems and obtained the optimal decision variables.

Introduction
générale

Introduction générale

Introduction générale

Le soudage par friction et malaxage (FSW) est considéré comme une technique moderne de fabrication, permettant d'assembler des alliages difficilement soudables par des procédés de soudages classiques. Ce procédé a été inventé en 1992 par l'Institut de Soudage (The Welding Institute). Le FSW est un procédé, du soudage à l'état solide est classé parmi les procédés de soudage basés sur l'échauffement de la matière, qui consiste à lier deux pièces en les amenant dans un état pâteux grâce à un pion en rotation. Lors du soudage par friction malaxage, un outil rotatif constitué d'un pion profilé et d'un épaulement est enfoncé dans la matière jusqu'à ce que l'épaulement touche la surface du matériau à souder. La matière est donc chauffée par friction à des températures où elle est facilement déformable. Lorsque l'outil avance, la matière s'écoule de l'avant vers l'arrière du pion pour former le joint soudé, performant est nécessaire pour obtenir des joints de qualité.

Les problèmes inhérents aux procédés de soudage par fusion d'alliages d'aluminium à haute résistance comme les fissures, la porosité ainsi que la diminution de résistance de la zone affectée thermiquement (ZAT) ne sont pas rencontrés dans le soudage par friction malaxage [1]. De plus, le retrait des oxydes qui constitue une grande partie du temps de préparation des joints à souder ainsi qu'une protection gazeuse ne sont pas nécessaires. Le procédé de friction malaxage n'est pas limité à la soudure des alliages d'aluminium. En effet, des résultats encourageants ont été obtenus avec des alliages de titane, de cuivre, de nickel, de magnésium ainsi qu'avec l'acier, l'acier inoxydable, des thermoplastiques et des matériaux composites à matrice métallique MMC [2]. Il est également reconnu comme une technique d'assemblage, permettant d'éviter les défauts de soudage, puisqu'au cours de la soudure

Ce procédé peut être réalisé dans diverses configurations géométriques de joints soudés tels que les joints de recouvrement et les joints bout à bout communément utilisés dans l'assemblage des tôles minces. Le soudage par friction-malaxage a émergé comme un processus à l'état solide prometteur avec la possibilité de joindre des alliages d'aluminium traditionnellement jugés non soudables [1].

Dans ce travail nous souhaitons étudier les effets des paramètres de soudage à savoir ; l'effort exercé sur le pignon, la fréquence de rotation et la vitesse d'avance de l'outil, sur les performances de soudage d'un alliage d'aluminium (AA6061T6), dans le but de déterminer les conditions opératoires conduisant à une qualité, résistance mécanique ainsi qu'une dureté

Introduction générale

optimales du joint de soudure. Pour se faire, nous avons recensé a travers une recherche bibliographiques approfondie divers modèles empiriques, issus de campagnes d'expériences, reliant les variables de décisions aux performances de soudage citées précédemment, Puis, nous avons formulé mathématiquement deux problèmes d'optimisation multi-objectifs avec et sans contrainte. Le premier vise à maximiser la qualité et la résistance mécanique sous limitation d'une dureté maximale du joint de soudure. Dans le second, nous cherchons à minimiser la dureté, maximiser la qualité et la résistance mécanique des pièces assemblées. Grace à l'algorithme génétique NSGA II, nous avons résolu les deux problèmes d'optimisation et pu obtenir les variables de décision optimales.

➤ Le premier chapitre dresse une recherche bibliographique sur les fondements des procédés du soudage par friction. Différents procédés du soudage sont également exposé avec leurs avantages et inconvénients.

➤ Le chapitre II s'articule sur la modélisation du procédé par la méthodologie des plans d'expérience et identification des paramètres du soudage géométriques et cinématiques. les performances du soudage. On suite, nous avons introduit deux méthodes de modélisation (Taguchi et surface de réponse).

➤ Le chapitre III consiste à une présentation générale sur l'optimisation et divers méthodes au début un état de l'art sur les caractéristiques des problèmes d'optimisation et les méthodes utilisées pour la résolution de ces problèmes, afin on à présenté des modèles mathématique reliant les performances et les paramètres du soudage par friction, qui seront utilisé dans la formulation des problèmes d'optimisation du soudage par friction FSW.

➤ Le chapitre IV, nous allons résoudre nos problèmes d'optimisation sur MATLAB Grace à l'algorithme génétique NSGA II.

CHAPITRE I :
GENERALITES SUR LE
PROCEDE DE SOUDAGE

Introduction

Le soudage est une technique d'assemblage permanent qui établit une continuité de nature entre les pièces soudées. Le terme soudure est utilisé pour désigner l'alliage reliant les pièces à assembler formé par la fusion des bords à assembler, avec ou sans adjonction d'un produit d'apport. La soudure peut donc être le résultat du seul mélange des matériaux de base (les matériaux à souder) ou du mélange des matériaux de base et d'un produit d'apport. En ce qui concerne les métaux, beaucoup sont soudables moyennant les études préalables requises pour la mise au point du mode opératoire ; citons les aciers (dits soudables), le cuivre, l'aluminium, le nickel et leurs alliages. Lors du soudage, il y a fusion locale des éléments à assembler, contrairement à ce qui se passe dans le cas du brasage où il n'y a jamais fusion des matériaux à assembler. En ce qui concerne les métaux on distingue trois types de soudures :

- La soudure homogène, dans laquelle les métaux de base et le métal d'apport éventuel sont tous de même nature.
- La soudure hétérogène de type « A » qui associe des métaux de base de même nature avec un métal d'apport d'une autre nature.
- La soudure hétérogène de type « B » où les métaux de base et le métal d'apport sont tous trois de natures différentes [1].

Dans ce chapitre, nous donnons une description plus ou moins détaillée sur le procédé récent de soudage par friction et malaxage (FSW), considéré en tant que nouvelle technique du 21^{ème} siècle, qui permet de souder des alliages difficilement soudables par des procédés de soudages classiques. Les différents paramètres, mis en jeu dans le procédé FSW, sont rappelés dans ce chapitre.

L'origine du soudage remonte à l'âge des métaux :

- à l'âge de bronze on soudait à la poche
- à l'âge de fer on soudait à la forge

L'exemple le plus ancien consiste en des petites boîtes circulaires en or datant de l'âge du bronze Et assemblées par chauffage et martelage d'un joint constitué de deux surfaces se recouvrant. Il a été estimé que ces boîtes ont été fabriquées il y a plus de 2000 ans.

Pendant l'âge du bronze, Les Égyptiens et les peuples de l'est méditerranéen ont appris à assembler par soudage des Pièces en fer. Plusieurs outils datant approximativement de 3000 ans ont été retrouvés. Pendant le Moyen Âge, l'art des Chaudronniers et forgerons s'est développé et plusieurs objets en fer ont été produits en utilisant la technique du martelage et soudage. Jusqu'au milieu du XIX^e siècle, les procédés de soudage évoluent peu, c'est vers 1850 qu'on commence à se servir du gaz pour chauffer les métaux à souder.

- Fin XIX^e siècle : mise en œuvre de nouveaux procédés :

Le soudage oxyacétylénique

Le soudage aluminothermique

Le soudage à l'arc électrique

Le soudage par résistance

Tous ces procédés connaîtront leur essor industriel vers 1920

I.1. Généralités sur le soudage

I.1.1. Définition de soudage

La soudure est un assemblage permanent de deux pièces métallique, caractérisé par l'effacement des contours primitifs des bords à assembler. la soudure peuvent s'effectuer :

- Sans pression extérieure, les bords étant portés à la température de fusion, et nécessitant Le plus souvent l'introduction dans le joint d'un complément de métal (métal d'apport) déposé en une ou plusieurs pièces.

I.1.2. Définitions et classification des procédés de soudage

Dans sa définition la plus générale, le soudage consiste à réunir de façon permanente deux ou plusieurs éléments, en assurant la continuité de la matière des parties assemblées soit par chauffage, soit par pression, soit par combinaison de l'un et l'autre, avec ou sans emploi d'un matériau d'apport. L'utilisation d'un métal d'apport répond à deux besoins : il permet d'une part de combler le jeu entre les pièces assemblées, et d'autre part de changer la composition chimique et la structure cristalline de la zone fondue afin d'obtenir les performances recherchées. De manière générale, le terme « soudage »

désigne l'ensemble des techniques mises en œuvre pour la réalisation d'un assemblage, et celui de « soudure » désigne le joint formé,

Le champ d'application du soudage ne se limite pas aux matériaux métalliques puisque l'on soude du verre, des céramiques ou des matières plastiques. Dans le cas le plus courant des matériaux métalliques, on peut distinguer le soudage autogène (assemblage de deux matériaux de base de même composition sans métal d'apport), le soudage homogène (les deux matériaux de base et le métal d'apport sont de même nature), et le soudage hétérogène (l'un au moins des trois matériaux, d'apport ou de base, est différent des autres) On associe aussi souvent au soudage deux autres techniques d'assemblage voisines, faisant appel à des mécanismes physiques de liaison de natures différentes :

- **Le brasage** consiste à lier les surfaces de deux pièces métalliques dans un joint à recouvrement avec jeu contrôlé (inférieur à 0,5 mm) par capillarité d'un métal d'apport fondu. Le métal d'apport utilisé doit avoir un point de fusion inférieur à celui des métaux de base, qui ne fondent pas pendant l'opération ;
- **le Soudo-brasage** se rapproche du soudage par son mode opératoire (le joint est réalisé en position bout à bout ou en angle), et du brasage par l'utilisation d'un métal d'apport dont la température de fusion est plus basse que celle de l'un au moins des métaux de base. il existe de nombreux procédés de soudage dont les principes et la mise en œuvre sont très différents. La classification de ces différents procédés peut s'effectuer selon le mode d'apport de l'énergie nécessaire pour réaliser la jonction.

Pour certains, l'assemblage est obtenu par fusion locale des éléments à assembler, sans action mécanique volontaire, en utilisant une source de chaleur telle qu'une flamme ou un arc électrique. Pour d'autres, la continuité métallique est obtenue par une action mécanique (frottement, pression), éventuellement associée à une fusion ou un échauffement localisé.

➤ **Soudage par pression**

Cette catégorie regroupe tous les procédés de soudage dans lesquels on obtient une soudure, en général sans métal d'apport, par l'application d'une pression ou d'une friction

suivie d'une pression, suffisante pour provoquer une déformation plastique à froid ou à chaud, assurant la continuité atomique entre les bords de la soudure.

➤ Soudage par pression et fusion

On retrouve dans cette catégorie le procédé de soudage par étincelage, qui consiste à fondre les surfaces à assembler à l'aide d'une décharge électrique avant d'appliquer une pression de contact, et surtout les procédés de soudage par résistance, pour lesquels le contact électrique entre les pièces est assuré par l'application d'une pression à l'aide d'électrodes de géométries variables, qui permettent ensuite de faire passer un courant de forte intensité à l'endroit du contact entre les pièces, entraînant par effet joule leur fusion.

Soudage par fusion sans pression : La technique de soudage par fusion, la plus courante, consiste à fondre les bords des pièces à assembler, sans application de pression volontaire, à l'aide d'une source d'énergie produite par une flamme, un arc électrique ou un faisceau de particules. Le métal des deux pièces se mélange alors à l'état liquide, et constitue après solidification la soudure. Cette famille comprend un grand nombre de procédés, Parmi lesquels les procédés de soudage à l'arc, qui sont les plus utilisés

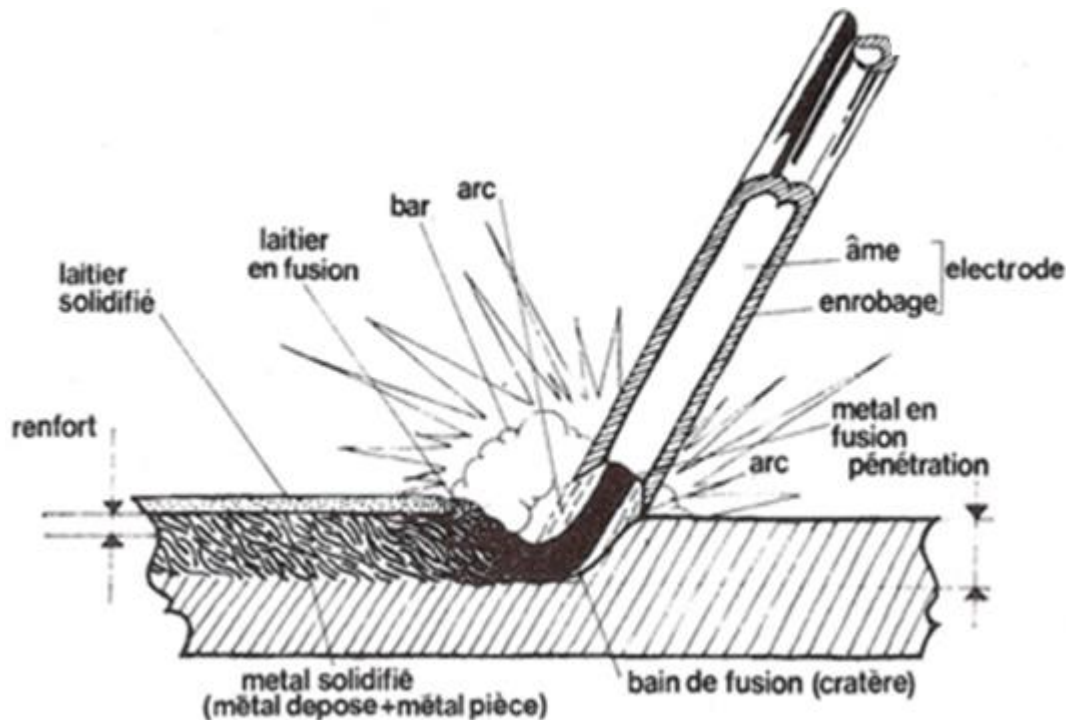


Figure I.1 Soudage sans pression

-Avec pression extérieure une température qui peut atteindre également la fusion

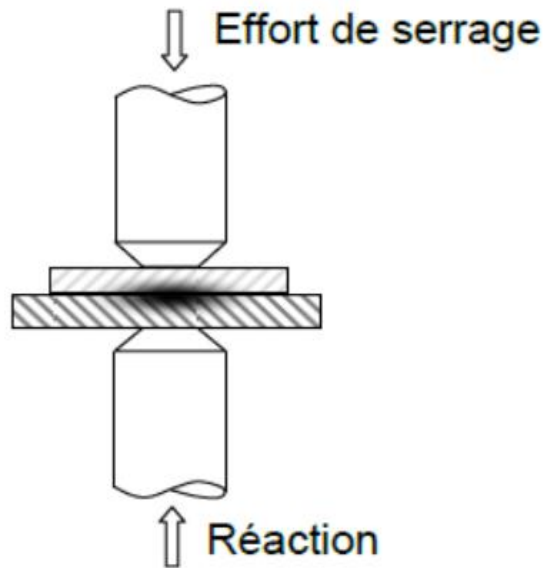


Figure I.2 Soudage avec pression

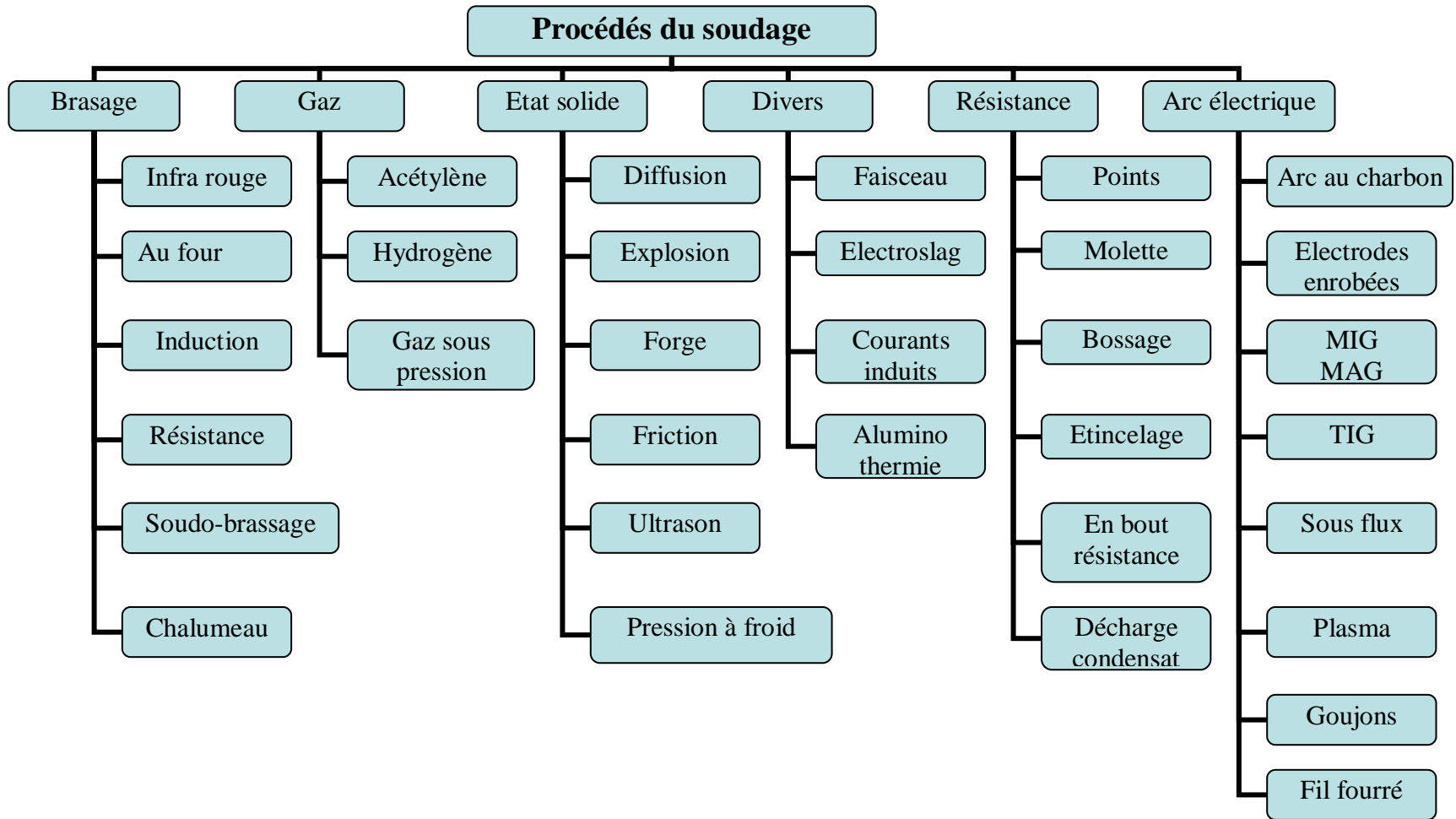
Le métal de base forme les parties à assembler de même nature ou de nature différentes. Le métal d'apport, identique ou différent du métal de base, peut intervenir dans l'élaboration du joint. Le métal du joint. Comprenant le métal déposé et les fondus qui sont dilué certain élément peuvent diffuser dans les parties.

Une zone plus ou moins étendue et adjacente de plus au-delà du joint peut être thermiquement affectée et subir des modifications de structure [2].

I.1.3. Procédé de soudage

Il y a plusieurs moyens pour obtenir la continuité métallique. Dans la majorité des cas, elle est obtenue par fusion locale. Elle peut aussi être obtenue par diffusion déformation, ...ext.

Les procédés de soudage sont nombreux et peuvent être classés suivant la façon de transférer l'énergie [3].



Organigramme de procédés du soudage

I.1.4. Principaux procédés du soudage**Tableau I.1** Principaux procédé du soudage

Procédé	ISO 4063	AWS A3-0
Soudage Oxyacétylénique	311	OXW
Soudage à l'arc à l'électrode enrobée	111	SMAW
Soudage à l'arc submergé	114	SAW
Soudage sous protection gazeuse actif à électrode fusible (MAG)	135	GMAW
Soudage sous protection gazeuse inerte à électrode fusible (MIG)	131	GMAW
Soudage fil fourré sans gaz	114	FCAW
Soudage sous protection gazeuse à électrode réfractaire (TIG)	141	GTAW
Soudage plasma	15	PAW
Soudage par résistance par point	21	RSW
Soudage par friction-malaxage	42	FSW
Soudage par faisceau d'électrode	76	EBW

I.2. Soudage par friction (malaxage)**I.2.1. Procédé de soudage par friction et malaxage**

Le soudage par friction et malaxage est un procédé inventé en 1991 par l'institut britannique de soudage (The Welding Institute). Les équipements du procédé FSW permettent de souder en deux ou trois dimensions et peuvent appliquer des efforts axiaux allant jusqu'à 90KN. La rigidité globale de ces machines assure une bonne précision du suivi de joint. De plus, les actionneurs et systèmes de guidage sont conçus pour accuser des efforts importants. Ceci permet de souder une large gamme de matériaux et d'épaisseurs. La figure 3-a présente la machine ESAB permettant de réaliser des soudures en deux dimensions et dont les caractéristiques sont : 89KN pour l'effort de plongée maximal, 2000tr/min pour la vitesse de rotation maximale 2000mm/min pour la vitesse d'avance maximale, 2m pour la longueur de soudure maximale. La figure 3-b présente la machine MTS de type portique à cinq axes permettant de réaliser des soudures en trois dimensions et dont les caractéristiques sont : 89KN pour l'effort de plongée maximal,

2000tr/min pour la vitesse de rotation maximale, 2000mm/min pour la vitesse d'avance maximale, 2m pour la longueur de soudure maximale, mesure des efforts possibles.



(a)

(b)

Figure I.3 Machines de soudage FSW de l'Institut de Soudure (Metz)

(a)- Machine ESAB. (b)- Machine MTS [9]

Dans ce procédé, la chaleur est générée, d'une part, par le frottement entre un outil métallique entraîné par une vitesse de rotation et une vitesse de translation et les deux plaques à souder, et d'autre part, par la dissipation plastique voir (figure 4)

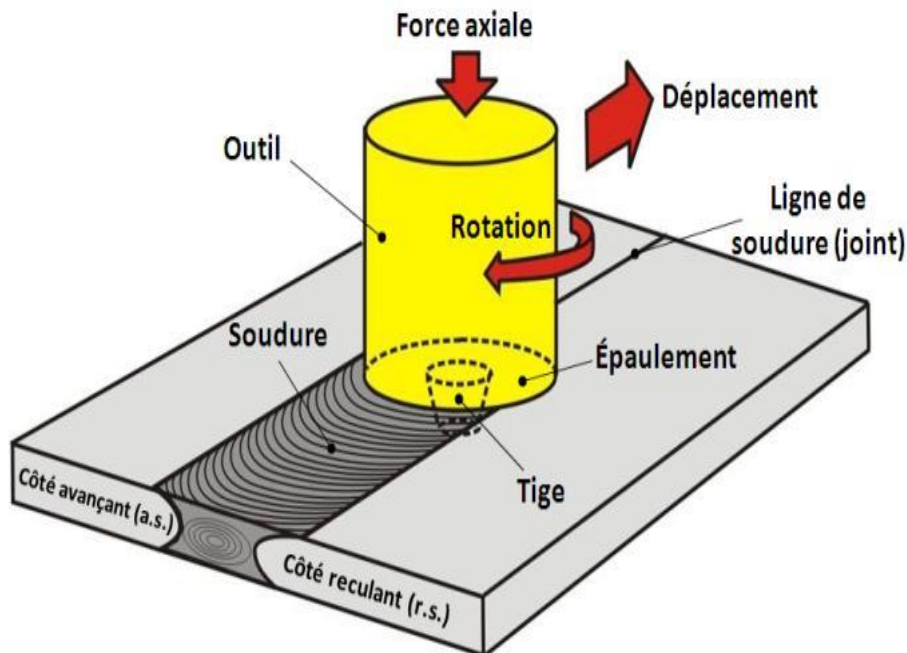


Figure I.4 Illustration du procédé de soudage par friction et malaxage [9]

Le procédé de soudage par friction et malaxage utilise un outil à haute résistance mécanique et thermique qui est constitué d'un épaulement (shoulder) prolongé par un pion (pin) coaxial qui réalise le malaxage (voir figure 5). Les tôles à souder sont fixées soigneusement sur un montage d'appui. La chaleur, générée par le frottement de l'épaulement et celle du pion, transforme la matière à l'état pâteux au voisinage de l'outil (figure 6) et facilite la pénétration et le déplacement de l'outil le long du joint à souder pour former la soudure après refroidissement. Les matériaux, utilisés pour les outils de soudage des tôles à base d'aluminium, sont, principalement, des aciers résistants aux hautes températures. La géométrie de l'outil est très importante dans le développement du procédé. Elle joue un rôle essentiel dans le malaxage de la matière et la génération de la chaleur. Le choix des dimensions et du profil du pion dépend de la nature des matériaux constituant les tôles à souder et de leur épaisseur.

La forme du pion est généralement tronconique et ou prismatique ou hélicoïdale et peut contenir des reliefs variés dans le but d'augmenter l'effet du malaxage du métal (figure 5) et, par suite, de rendre plus facile la formation de la soudure (figure 6). 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 de la géométrie du pion.

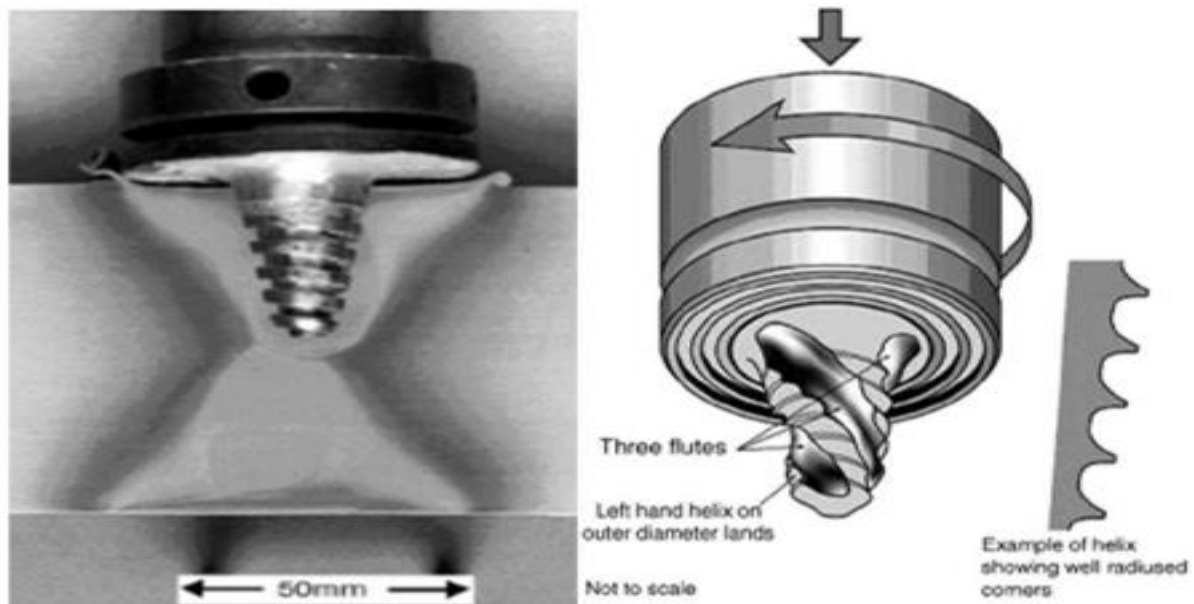


Figure I.5 Exemple de géométrie d'outil [9]

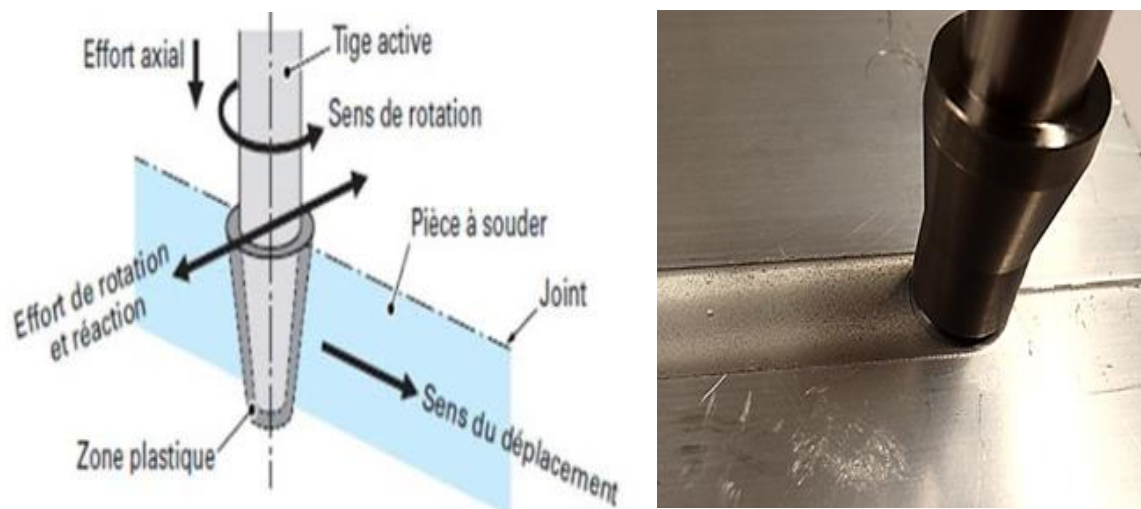


Figure I.6 formation de la soudure [9]

L'épaulement est globalement plan, ses dimensions transversales restent suffisamment grandes 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. Le soudage s'effectue selon les étapes suivantes :

➤ **Phase de pénétration de l'outil (figure 7-a) :**

Dans cette étape, on réalise la pénétration du pion sous l'effet d'un effort vertical variant de 15 KN jusqu'à une trentaine de KN. En effet, le pion pénètre progressivement à l'intérieur du joint, à l'aide de la vitesse de rotation, jusqu'à ce que l'épaulement soit en contact avec les plaques à souder.

➤ **Phase transitoire d'échauffement par frottement (figure 7-b) :**

Cette étape transitoire consiste à entraîner localement l'épaulement dans un mouvement de rotation pour transformer la matière à l'état pâteux. Cette étape de pré-soudage dure une à trois secondes avant le passage à l'étape de soudage.

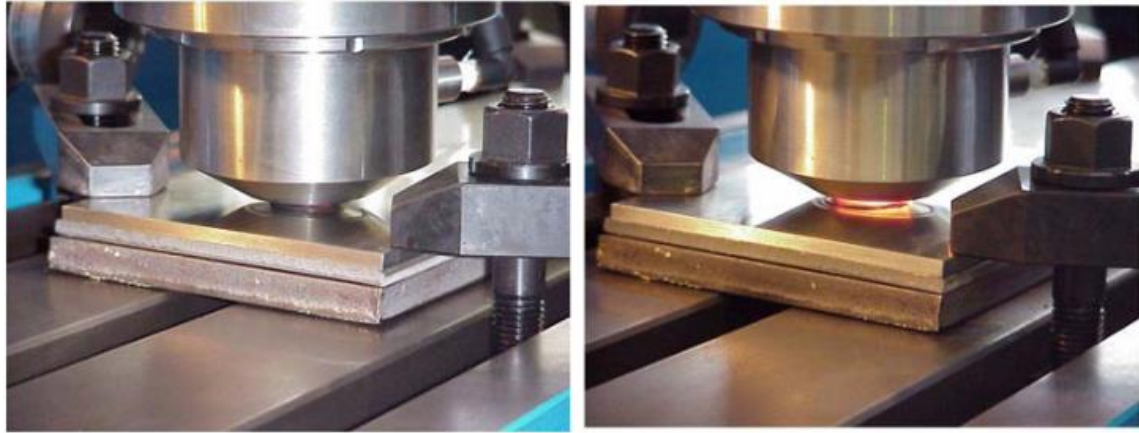


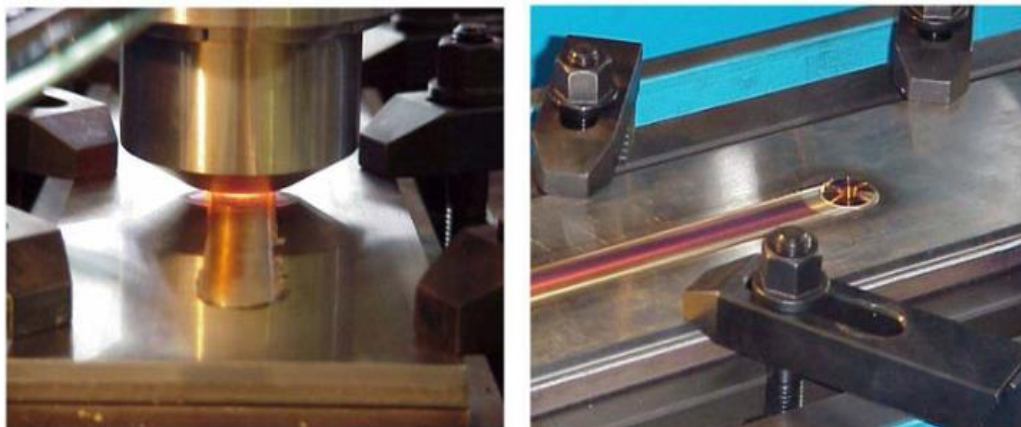
Figure I.7 (a)- Fin de phase de pénétration
(b)- Phase de chauffage [9]

➤ **Phase de soudage (figure 8-a) :**

Dans cette étape, l'outil est animé d'un mouvement de translation dans la direction du joint représentant l'interface des deux plaques à souder.

➤ **Phase de retrait de l'outil (figure 8-b) :**

A la fin du soudage, l'outil est retiré des deux plaques à souder. Ce retrait laisse un trou difficile à remplir de façon simple. Ce problème peut être résolu dans le cas des soudures linéaires ouvertes par l'élimination des défauts au début et à la fin du joint soudé. Dans le cas des soudures circulaires fermées, la fin du joint soudé au niveau du recouvrement peut être résolue de façon particulière, par exemple par fusion. De plus, le trou peut être contourné par l'utilisation d'un outil à pion rétractable.



(a)

(b)

Figure I.8 (a) phase de translation - (b) trou à la fin de soudure [9].

La figure 9 montre une comparaison de la distorsion entre le soudage FSW et le soudage à l'arc sur de l'aluminium de 5mm d'épaisseur, ce qui permet d'observer que le joint soudé est soumis à de faibles distorsions dans le cas de FSW.

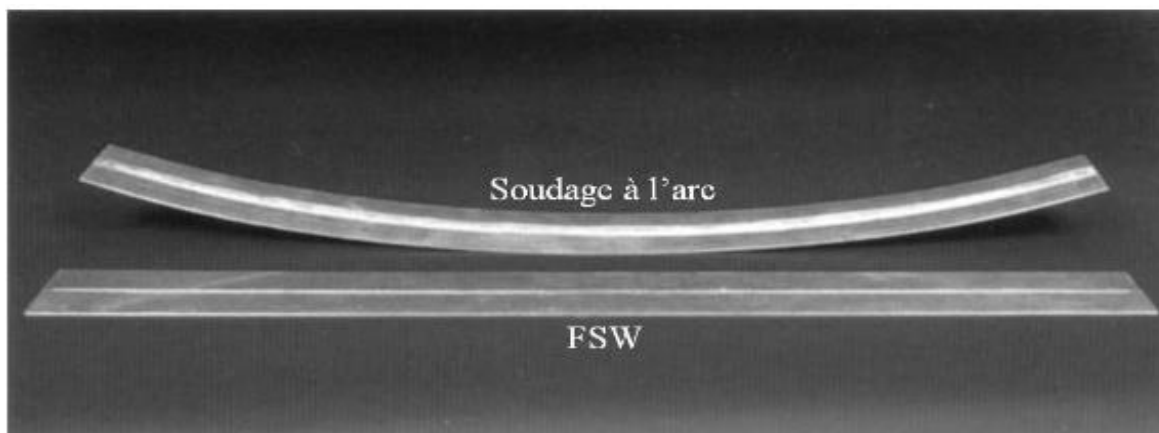


Figure I.9 Comparaison de la distorsion entre le soudage FSW et le soudage à l'arc [9]

I.2.2. Phénomènes physiques observés dans le procédé

Les divers phénomènes physiques, mis en jeu pendant le soudage par FSW, sont de trois types :

I.2.2.1. Mécanique

En général, les phénomènes mécaniques sont dus au frottement à l'interface entre l'outil et les pièces soudées et à la déformation plastique du matériau. La source de frottement est le contact de l'outil en rotation avec le matériau. Le frottement est caractérisé par une contrainte de cisaillement à l'interface. La déformation plastique trouve sa source dans le mouvement du matériau en rotation sous l'effet du frottement à l'interface outil plaques et dans le malaxage dû au pion. La déformation plastique est importante dans la région située sous l'outil.

I.2.2.2. Thermique

Les deux phénomènes thermiques principaux au cours du procédé, FSW sont la génération et la conduction de la chaleur. La génération de la chaleur vient d'une source de chaleur surfacique due au frottement à l'interface et une source volumique due à la déformation plastique du matériau. La répartition de la génération de la chaleur entre ces

deux sources dépend de la condition de contact entre l'outil et le matériau. En effet, pour un contact presque collant, la chaleur est principalement générée par la déformation plastique du matériau. Par contre, pour un contact glissant, la plus grande partie de la chaleur est créée par le frottement. La chaleur générée est transférée principalement par conduction. Le transfert par conduction dans les pièces soudées dépend de deux choses. Premièrement, il dépend de la conductivité thermique du matériau soudé, par exemple, l'aluminium est caractérisé par une grande conductivité thermique, ce qui contribue à évacuer rapidement la chaleur créée. En second, il dépend de la chaleur évacuée dans la plaque support et dans l'outil c'est-à-dire la résistance des interfaces de contact aux transferts thermiques (voir figure 10).

Finalement, la chaleur est évacuée aussi par convection entre l'outil, les deux plaques à souder, la plaque support avec le milieu extérieur (ambient).

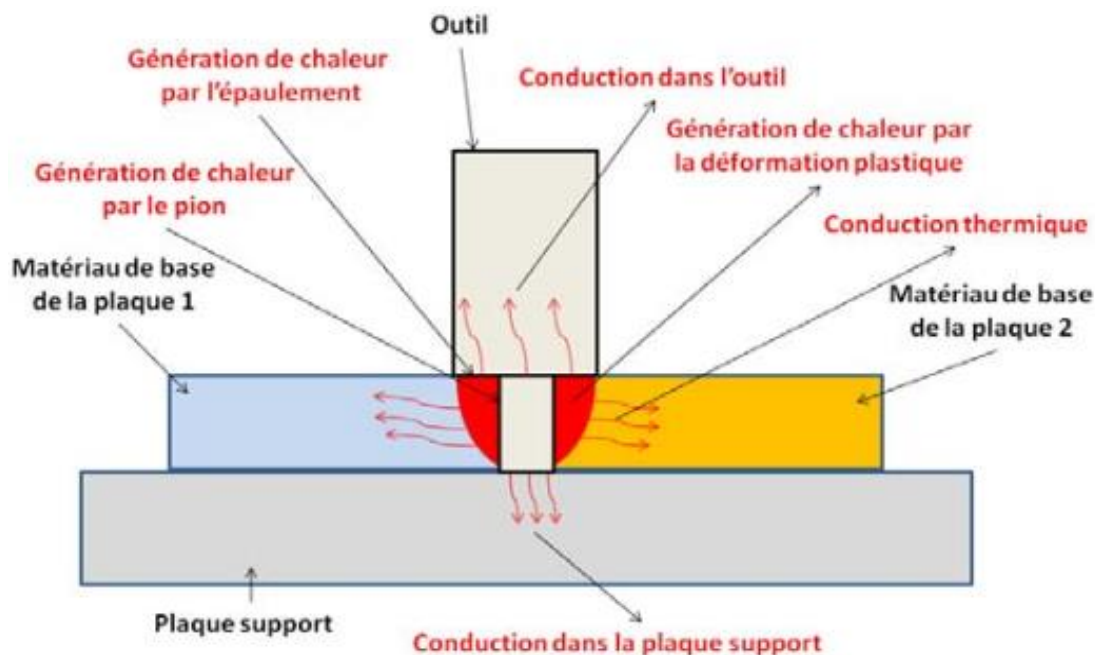


Figure I.10 Transferts thermiques induits par le procédé FSW [9]

I.2.2.3. Métallurgie

Les phénomènes mécaniques et thermiques, dans l'ensemble des procédés de soudage par fusion, entraînent une modification de la microstructure du matériau de base et ses propriétés mécaniques. Cet inconvénient provient des phénomènes métallurgiques qui

apparaissent lors du soudage et qui représentent le lieu de concentration des contraintes dans le cas des sollicitations externes. Le premier phénomène métallurgique est la modification de l'état de précipitation du matériau.

Le second est la recristallisation du matériau. Le procédé de soudage FSW permet au contraire d'obtenir des modifications métallurgiques moins importantes, par rapport aux autres procédés, causées par les différents changements de phase au cours de soudage.

Une coupe transversale du joint soudé permet d'obtenir les différentes zones dans lesquelles la matière est affectée thermiquement (Heat Affected Zone HAZ) ou thermo-mécaniquement (Thermo-Mechanical Affected Zone TMAZ) (Voir figure 11). Chaque zone dépend de la température atteinte, des modifications métallurgiques et des déformations subies au cours du procédé de soudage.

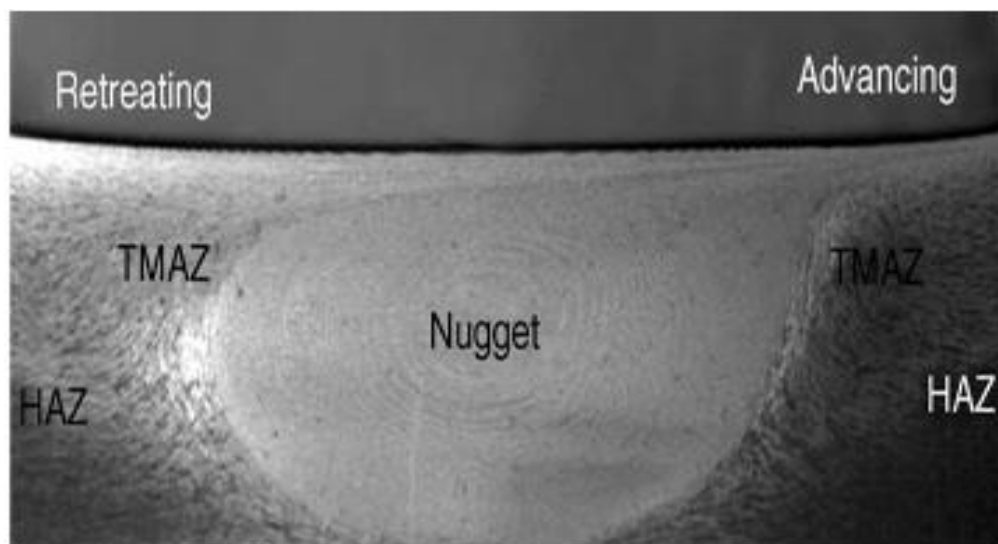


Figure I.11 coupe d'une soudure sur un alliage d'aluminium [8]

I.2.3. Paramètres du procédé

Dans ce paragraphe, on cite quelques facteurs majeurs dans le procédé FSW à savoir : la vitesse de rotation de l'outil (tr/min), la vitesse d'avance de l'outil (mm/min) le long de la ligne de joint, l'angle d'inclinaison de l'outil et l'effort de plongée de l'outil dans la matière à souder.

I.2.3.1. Vitesse de rotation et vitesse d'avance

La vitesse de rotation et la vitesse d'avance de l'outil dépendent de la nature de l'alliage à assembler et des dimensions des plaques. Le couple maximal résistant permet d'optimiser le coût énergétique du procédé. Dans les applications connues, la vitesse de rotation est de l'ordre de 200 à 500 tr/min et la vitesse de soudage reste limitée et généralement inférieure à 1m/mn. En effet, la progression de l'outil doit permettre à la matière de s'écouler correctement de l'avant vers l'arrière de l'outil. Les deux vitesses sont liées par le rapport [vitesse d'avance/ (rayon du pion × vitesse de rotation)] pour qualifier le soudage. Si ce rapport est faible, on dit que le soudage est chaud car le malaxage et la chaleur dissipée par frottement seront élevés et engendreront de fortes températures. Par contre, si ce rapport est grand, on dit que le soudage est froid car la chaleur dissipée par frottement entre l'outil et les plaques ainsi que le malaxage de la matière n'induisent pas des températures très élevées dans les pièces.

I.2.3.2. Angle d'inclinaison de l'outil

L'angle d'inclinaison de l'outil par rapport à la surface des plaques à souder est un paramètre important à prendre en considération dans l'optimisation du procédé car son choix approprié permet à la matière de passer efficacement de l'avant vers l'arrière du pion.

I.2.3.3. Efforts appliqués

Les efforts appliqués sont de trois types :

➤ **Effort appliqué en phase de pénétration**

Pour permettre à l'outil de progresser dans le joint à souder, un effort axial est imposé. Grâce à l'action de l'effort axial et au changement de comportement du matériau à l'état pâteux (les déformations plastiques et les frottements mis en jeu entre le pion et les deux plaques provoquent une montée progressive de la température), le pion s'enfonce progressivement entre les deux plaques à souder en extrudant la matière malaxée. Il pénètre dans la matière jusqu'à ce que l'épaulement soit en contact avec la surface des deux plaques à souder. Cette phase initie les conditions thermomécaniques dans lesquelles l'opération de soudage va débiter, en effet, elle est peu étudiée dans la littérature comme le montre [Gerlich et al] [4].

➤ Effort appliqué en phase transitoire d'échauffement

L'effort apparaît dans la phase transitoire d'échauffement lorsque l'épaulement entre en contact avec la surface des plaques à souder. Zaeh et al [10] montrent que l'usinage d'un pré-trou permet de réduire les efforts appliqués en fin de pénétration.

➤ Effort appliqué en phase de soudage

La formation du joint soudé exige que l'épaulement de l'outil soit dans une position par rapport à la surface des tôles qui permet d'assurer l'apport d'énergie par frottement et de contenir le matériau malaxé [5]. Une mauvaise position de l'outil peut entraîner la formation de défauts [6]. Elle peut se contrôler de deux manières, soit par le pilotage de la position verticale de l'outil, soit par le contrôle de l'effort vertical appliqué sur l'outil au cours de la phase de soudage. La minimisation de l'effort appliqué améliore l'efficacité énergétique du procédé. Cet effort doit être optimal pour obtenir une bonne qualité du joint. Zhang et al [9] ont montré, à travers la simulation numérique, qu'un effort trop faible entraînait la formation d'un défaut tunnel à l'arrière du pion à cause d'une déformation plastique du matériau insuffisante. Cependant, un effort trop grand implique un enfoncement de l'outil dans la matière à cause d'une déformation plastique et d'une température du matériau trop importante.

Parmi les solutions retenues qui permettent d'améliorer le malaxage, on trouve l'utilisation d'outils filetés et/ou vrillés car ces derniers engendrent un mouvement vertical du métal déplacé, ce qui mène à une meilleure intégrité du joint. A l'inverse, un outil lisse peut mener à un joint montrant des cavités internes. Cela conduit à une réduction importante de la résistance du joint en traction.

I.2.3.4. Avantages et limitations du procédé FSW

Par rapport aux procédés de soudage classiques, le procédé FSW possède des avantages qui peuvent être classés comme suit :

➤ Avantages liés au procédé

- Large gamme d'épaisseurs soudables.
- Préparation des surfaces des pièces à assembler par usinage mécanique.
- Pas de décapage chimique avant soudure pour alliages légers.
- Possibilité de souder des matériaux différents.

- Soudure en une seule passe sur toute l'épaisseur, ou en deux passes opposées sur épaisseurs fortes.
- Pas de finition après soudage.
- Procédé sans apport de matière pour la réalisation de la soudure.
- Ce procédé est lui-même la source d'énergie.
- Possibilité de soudure dans toutes les orientations.
- **Avantages liés à la soudure par FSW :**
 - Gamme de matériaux très étendue.
 - Possibilité de soudure des alliages qui sont difficiles à souder par les procédés classiques.
 - Soudage à l'état solide : pas de solidification du bain de fusion (pas de défaut De porosité, pas de fissuration à chaud).
 - Propriétés mécaniques bonnes.
 - Effets limités des contraintes résiduelles.
 - Faible distorsion (figure 9).
- **Avantages économiques et environnementaux :**
 - Procédé non polluant ; pas de projections de gaz nuisibles ni d'émanation de fumées.
 - Procédé économique en énergie.
 - Pas de circulation d'eau de refroidissement.
 - Pas de finition après soudage (sauf pour les soudures circulaires).
 - Bon rendement énergétique.
- **Avantages liés à l'équipement :**
 - Automaticité aisée du procédé ; contrôle par commande numérique.
 - Equipement électromécanique de conception simple de type machine-outil.
 - Pas de protection thermique.
 - Consommables limités à l'outil et à l'énergie électrique.
 - Possibilité d'un contrôle en ligne des paramètres.

Ces avantages justifient l'adaptation de ce procédé aux alliages d'aluminium.

Le soudage se réalise essentiellement sur des pièces minces bout à bout, mais accepte d'autres configurations de joints tels que le soudage d'angle ou en "T" ou le soudage par superposition.

Les différentes configurations possibles pour le soudage FSW sont présentées sur la (figure 12).

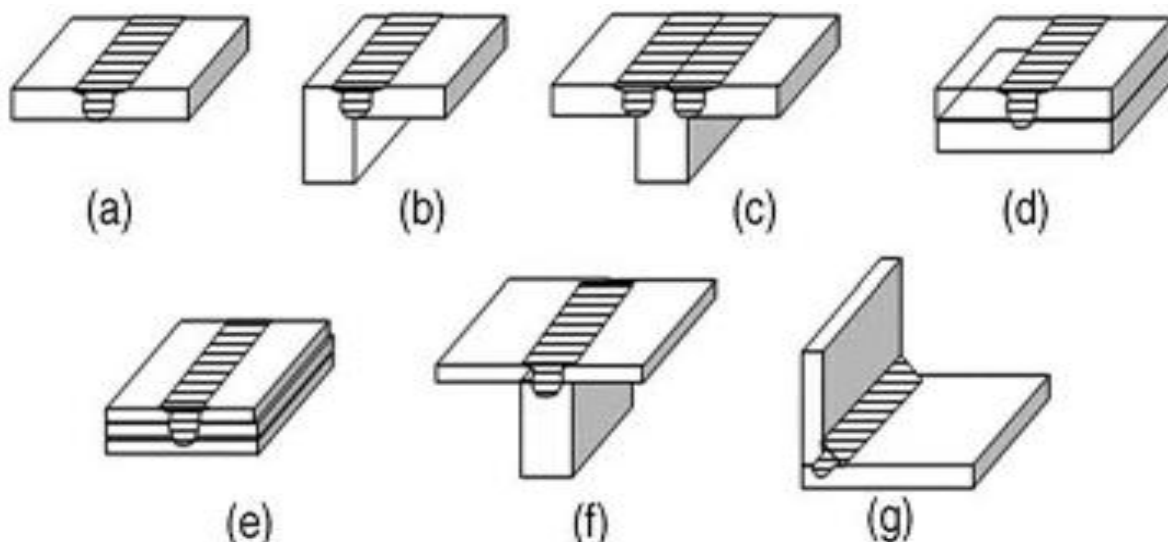


Figure 12 Les différentes configurations de soudage effectuées par FSW : (a) bout à bout, (b) en coin, (c) en T, (d) transparence, (e) transparence multiple, (f) T par transparence, et (g) angle [7]

Les limitations du procédé de soudage FSW peuvent être résumées comme suit :

- Bridage très important dû aux grands efforts mis en jeu.
- La présence d'un trou après retrait du pion à la fin de la soudure qui peut être contournée par l'utilisation d'un outil à pion rétractable.

I.2.3.5. Mise en œuvre du procédé

a) Préparation des pièces à souder

Dans ce procédé, il n'y a ni perturbation ni incidence éventuelle sur la qualité géométrique et mécanique de l'assemblage. En particulier, pour des alliages d'aluminium, il n'est pas nécessaire de décaper les pièces avant de les souder et, de plus, les oxydes sont broyés mécaniquement et se diluent dans le joint soudé. En principe, l'outil entre en

contact avec la matière des deux pièces à souder et sa vitesse de rotation et l'effort appliqué conduisent naturellement à sa plongée. Cependant, dans le cas des matériaux durs ou de tôles de forte épaisseur, on peut faciliter sa plongée en pratiquant un perçage préalable qui se comble ensuite par la soudure.

b) Matériaux

Le procédé de soudage FSW est bien adapté, particulièrement, aux alliages d'aluminium d'épaisseurs moyennes (6 à 10mm). Pour développer les conditions d'application du procédé à ces matériaux industriels, de nombreuses recherches sont menées. Les autres procédés de soudage par fusion rencontrent des limites technologiques et impliquent des mesures de mise en œuvre plus contraignantes, ce qui permet de distinguer le procédé FSW par sa simplicité.

L'application du procédé de soudage FSW aux autres matériaux réputés soudables comme le cuivre et ses alliages, le plomb, le titane et ses alliages, les alliages de magnésium, le zinc, les aciers doux et les matières plastiques, fait actuellement l'objet des études de recherche. Pour les aciers, la difficulté principale réside dans le choix du matériau de l'outil et sa géométrie.

c) Epaisseurs

Le procédé FSW a été développé dans le cadre d'épaisseurs moyennes. Aujourd'hui, il est envisagé dans le cadre de tôles minces, soit bout à bout, soit par superposition, telles sont les configurations les plus utilisées dans la construction automobile.

d) Positions de soudage

Notons aussi qu'au cours du procédé de soudage par friction et malaxage, il y a la possibilité de déplacer soit la pièce soit l'outil. de plus, la gravité n'a pas d'influence sur le métal en phase viscoplastique, donc le soudage peut être réalisé sous différentes positions (horizontale, verticale, au plafond et orbitale) des plaques à souder.

Conclusion

Le soudage par friction est un procédé de soudage multiple et innovateur qui a de nombreuses applications dans différentes branches de l'industrie. Les avantages de ce procédé sont que des assemblages de très haute qualité peuvent être réalisés, que ce procédé est beaucoup plus rapide que les procédés conventionnels et qu'il peut être complètement automatisé de sorte qu'une qualité constante est garantie. De plus, ce procédé de soudage présente d'importants avantages en matière écologique: il n'y a aucune émission de fumées, UV ou rayonnements électromagnétiques. Aucun métal d'apport ou gaz de protection ne sont utilisés.

CHAPITRE II :
MODELISATION DU
PROCEDE DE SOUDAGE
PAR FRICTION ET
MALAXAGE

Introduction

On appellera modèle, une représentation mathématique, graphique ou informatique des objets et des relations entre ceux-ci dans un domaine restreint du monde réel, objet d'un questionnement. La modélisation est un moyen d'explicitier la complexité afin de mieux comprendre le fonctionnement d'un système et de prendre les décisions le concernant.

Dans ce chapitre nous allons faire une étude bibliographique sur la modélisation avec une sorte de rendu dans le but, de nous aider à modéliser les paramètres (les entrées) et les performances (réponses) de FSW.

Ensuite nous expliquons comment les méthodologies (Taguchi et surface de réponse) qui modélisent les réponses en fonction des paramètres FSW, afin nous modélisons le temps et le coût dans FSW.

II.1. Modélisation

II.1.1. Qu'est ce qu'un modèle ?

Un modèle est une représentation d'un objet ou d'un phénomène dans un cadre idéalisé par les hypothèses et les règles qui ont servi à sa construction.

Il simplifie la réalité et ne garde que les caractéristiques essentielles par rapport aux objectifs auxquels il cherche à répondre [11].

Un modèle n'est pas la réalité mais une simplification de celle-ci

Toujours observé la nature et s'est construit une idée (un modèle) de son fonctionnement.

Ce modèle peut s'exprimer :

- **Verbale**ment : assertion, affirmation
- **Graphique**ment: schéma conceptuel
- **Mathématique**ment: équations

Exemple : sur un objet mécanique $P_p = f_1(P,1) f_2(N) f_3(t^\circ C) E T$

f_1, f_2, f_3 facteurs tenant compte des effets d'un objet mécanique disponible pour l'opération mécanique, de contrainte et de la température. E coefficient de conversion de la quantité d'énergie. T température

II.1.2. Définition du phénomène

Il s'agit de faire le modèle conceptuel qui précise ce que l'on connaît ou suppose du phénomène étudié. Cette phase est plutôt du domaine des biologistes, physiciens, économistes, ou sociologues (ou plus généralement des "mathématiciens" tels que le décrit Jean Boiffin).

Cependant, il existe des méthodologies, comme la systémique par exemple, qui peuvent être mobilisées pour aider le mathématicien à construire ce modèle conceptuel.

Cette définition utilisera trois types de concepts :

➤ **Les objets**

- ils peuvent être contrôlables ou non contrôlables
- mesurables, observables ou non
- simples ou composés (plus ou moins complexes)
- physiques ou conceptuels

➤ **les relations fonctionnelles**

- causales
- structurelles

➤ **Les événements : il s'agit des événements de discontinuité du phénomène.**

- De plus, il est nécessaire de préciser la nature des données dont on pourra disposer relativement aux objets décrits ci dessus. Un des enjeux du processus de modélisation sera justement de mettre en regard les possibilités d'accès aux données et les objectifs du modèle d'une part, avec le niveau de détail d'une modélisation d'autre part. Ces données peuvent être quantitatives : discrètes, continues, spatialisées, fréquentielles, etc.
- Qualitatives
- symbolique ou logique (appartient ou pas à un ensemble par exemple)
- déterministes ou stochastiques ou encore floues
- issues d'images
- statiques ou dynamiques
- ou enfin, on peut ne pas disposer de données relatives aux objets.

Chapitre II : Modélisation du procédé du soudage par friction et malaxage

➤ **Le processus de modélisation**

Le processus de modélisation va donc être de mobiliser les connaissances dont on dispose (relations fonctionnelles, informations) pour atteindre les objectifs fixés. Ce processus, couvre alors plusieurs phases qui ne seront pas toujours nécessaires, en fonction des types d'information et des objectifs du modèle. A priori cet ensemble de procédures décrit aussi bien le processus de modélisation mécaniste que la modélisation statistique. Le processus ne parcourt pas linéairement les phases, mais est fait de multiples allers retours [12].

- Clarification des objectifs précis du modèle et bilan des connaissances du phénomène.
- Conception, formalisation, caractérisation : C'est à ce niveau que se réfléchit le niveau de détail du modèle, en fonction de l'objectif visé et des informations potentiellement accessibles. Il s'agit de traduire sous une forme mathématique (équations différentielle par exemple)
- Implémentation et utilisation : y compris la vérification que le modèle conceptuel a été traduit correctement sous forme mathématique (ou logique) et que le code informatique est correct.
- Compréhension des propriétés : (Remarque : pour ces différentes phases i à iv, les données ne sont pas nécessaires). On peut mettre ici la validation qualitative, ou l'analyse de sensibilité par exemple,
- Planification : Il peut s'agir d'optimiser le choix des données à recueillir ou bien de définir de quelles données il faudrait disposer pour répondre à un objectif. Faut-il enquêter, expérimenter, faire de la bibliographie, faire intervenir des experts, etc.
- Identification : estimation des paramètres du modèle.
- Validation : et délimitation d'un domaine de validité du modèle pour un critère que l'on définit. Il s'agit bien de validation qualitative et quantitative.

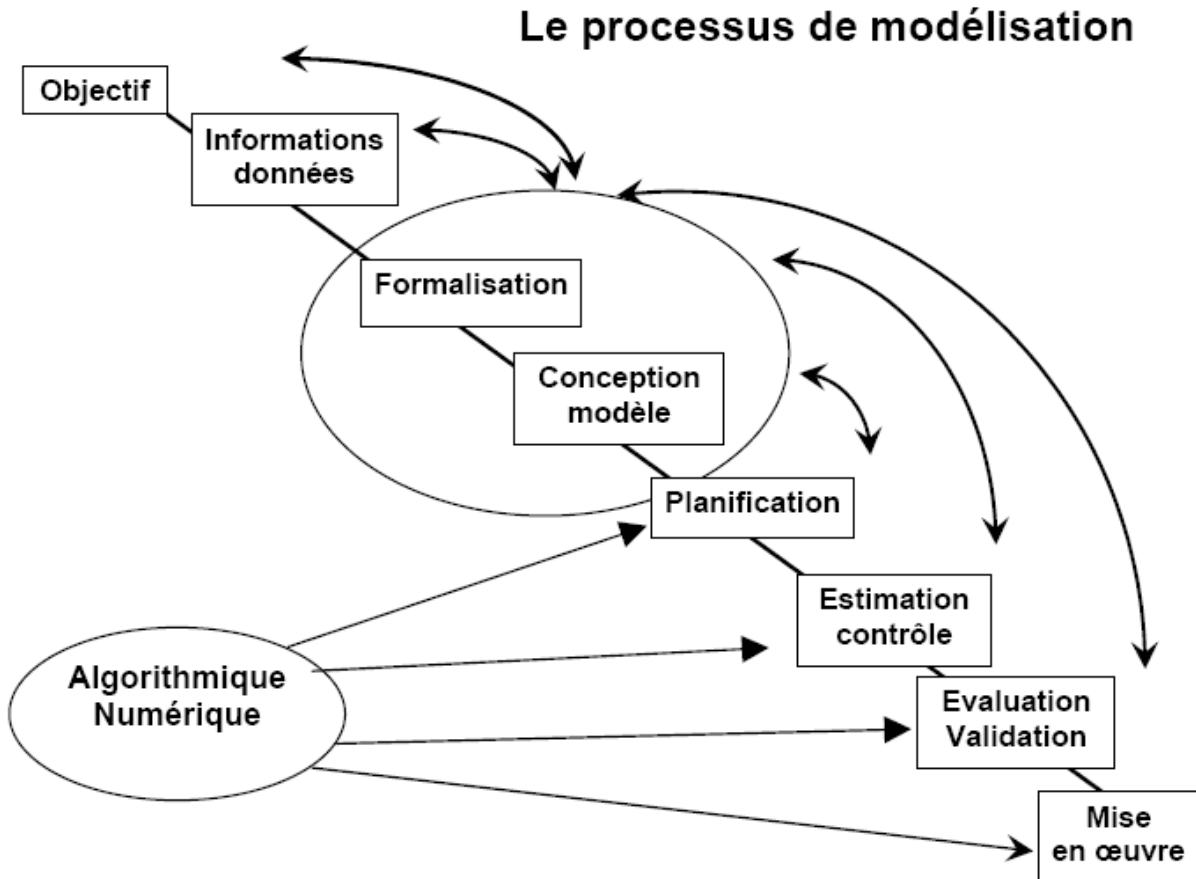


Figure II.1 Le processus de modélisation

➤ Rôle de la modélisation

Dans la démarche scientifique il s'agit ici des modèles qui décrivent le fonctionnement de processus à l'échelle de la cellule, l'expression de ces processus pouvant se faire à l'échelle du phénotype.

II.1.3. Divers modèles

II.1.3.1. Caractérisation d'un système dans une optique de modélisation

$Z(z_1, z_2, z_3, \dots)$: Variables d'état qui décrivent l'état du système. Elles résultent des processus d'échanges dans le système. Les flux de ces échanges sont appelés variables de flux.

$$\text{variables d'entrée} \rightarrow \left\{ \begin{array}{c} \text{systeme} \\ Z(z_1, z_2, z_3, \dots) \end{array} \right\} \rightarrow \text{variables de sortie (du modèle)}$$

Variables d'état les variables d'entrée sont dits variables de forçage car elles sont imposées au système par le milieu extérieur dans notre cas c'est sont des paramètres, les variables de sorties sont celles du modèle dans notre cas c'est sont des performances.

Tableau II.1 différents types de modèles

Types de modèles	
Qualitatif	Quantitatif
Déterministe	Stochastique
Descriptive (empirique)	Mécanique
Dynamique	Statistique
Analytique	Numérique

II.1.3.2. Les modèles analytiques

Une première approche de la simulation de phénomènes physiques est la modélisation analytique. C'est l'approche qui requiert le moins de ressources informatiques puisqu'elle cherche à approcher le phénomène et/ou la structure étudiés de façon à avoir le modèle le plus simple possible. Pour cela, les modèles analytiques se basent sur les équations de base de la théorie régissant un phénomène et les étudient sur une représentation abstraite du système réel, prenant en compte tout ou partie de la géométrie de la structure analysée. Par exemple, pour étudier le mouvement d'une voiture avec un modèle analytique simple, on ne prend pas comme représentation la voiture elle même, mais on peut plutôt prendre un point dans l'espace, auquel on attribue une masse et une vitesse. Pour définir les mouvements de ce point, on se base sur la théorie de la mécanique du point (principe fondamental de la dynamique). A partir de ce modèle simple, le mouvement de notre objet pourra être évalué dans la limite de la modélisation. En effet, on ne tient pas compte de paramètres qui peuvent modifier son comportement : par exemple, la voiture roule sur quatre roues sur lesquelles les masses peuvent être réparties différemment... Avant de se lancer dans un modèle analytique, il faut donc définir quelles sont les variables intéressantes et pertinentes qu'on veut modéliser et celles qui ne le sont pas et que l'on néglige. Mais il faut aussi remarquer que le choix des variables se fait en référence à une théorie : si l'on cherche à caractériser les forces, c'est qu'on a les équations de la mécanique classique en tête ! Lorsque le cadre théorique est connu et le modèle défini, on cherche à résoudre les équations du phénomène étudié. Deux routes sont alors possibles : résoudre les équations à l'aide d'un ordinateur (il faut alors se poser la question de la précision numérique de l'algorithme utilisé), ou faire des approximations sur les équations pour chercher une solution analytique simple

Chapitre II : Modélisation du procédé du soudage par friction et malaxage

II.1.3.3. La différence entre modèle analytique et numérique

- analytique : un modèle est analytique lorsqu'il est écrit sous forme d'équation mathématique dont les solutions sont précises [13].

$$\frac{dy}{dt} = \alpha y \Rightarrow y = y_0 e^{\alpha t}$$

- numérique : un modèle numérique lorsqu'il est solvable numériquement (pas de solution analytique).

$$\frac{dy}{dt} = \alpha y \Rightarrow y(t + \Delta t) = y(t) + \alpha y(t) \Delta t$$

II.1.3.4. Les modèles empiriques

Statistique, construit en se basant sur des observations

- Les modèles empiriques (statistique).
- modèles de régressions linéaires simples et multiples.
- modèles non linéaires, modèles à base de distributions théorique de probabilités.
- **Objectif** : établir des relations statistiques entre une variable qu'on souhaite prédire et des variables potentiellement capables d'expliquer cette variable.
- **Modèle linéaire simple** : régression linéaire donnant une équation fonctionnelle de prévision entre deux variables.

$$y = f(x) = \alpha + \beta x + \varepsilon$$

Où x est la variable indépendante (explicative ou prédictive) et y est la variable dépendante (réponse ou prédite).

ε est l'erreur de prédiction de y_i en x_i .

- **Modèle linéaire multiple**

$$y = f(x_i) = \alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p + \varepsilon$$

Où x_i sont les variables indépendantes et y est la variable dépendante [13].

II.2. Les paramètres du soudage par friction

II.2.1. Les paramètres déterminants du soudage par friction et malaxage

De nombreux paramètres ont un rôle non négligeable sur la qualité d'un assemblage soudé par friction et malaxage. Les travaux de (Record et al, 2004[35]) ont consisté à examiner l'influence des paramètres suivants :

- vitesse de rotation de l'outil ;
- vitesse de soudage (vitesse de translation de l'outil) ;
- profondeur de plongée de l'outil ;
- dimensions de l'outil : diamètres de l'épaulement et du pion, longueur du pion ;
- force de plongée ;

Localisation de la plongée de l'outil (ce paramètre donne l'endroit où est introduit l'outil dans les plaques en fonction des bords des plaques) ;

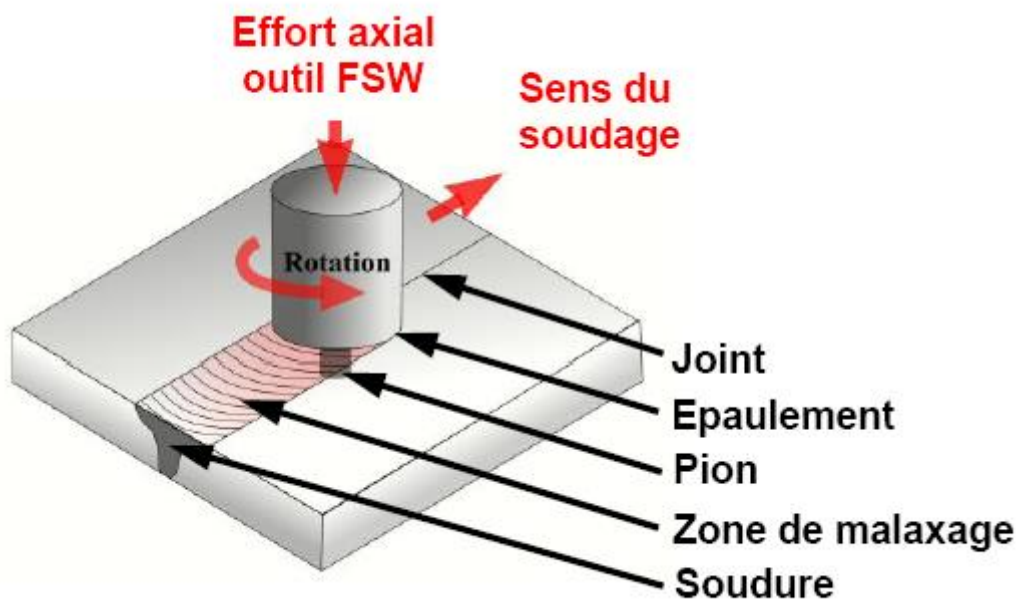


Fig II.2 Illustration du principe de soudage par friction malaxage

II.2.2. Lien entre vitesse de rotation et vitesse de soudage

Vitesse de soudage et vitesse de rotation de l'outil sont naturellement variables en fonction de la nature de l'alliage à assembler et des dimensions des pièces. Ces paramètres devront

Chapitre II : Modélisation du procédé du soudage par friction et malaxage

donc être adaptés à fin que l'échauffement et le brassage de la matière soient optimaux tout en assurant une bonne cadence de soudage. Généralement la vitesse de rotation est de l'ordre de la centaine de tours par minute (200 à 500tr.min⁻¹) et la vitesse de soudage est de l'ordre du $mm.s^{-1}$.

De plus, le choix de la valeur de ces deux vitesses est lié. Il est d'usage d'introduire le rapport

$$\frac{\text{vitesse de soudage}}{\text{rayon du pion} * \text{vitesse de rotation}}$$

Pour qualifier le soudage. Si ce rapport est très grand, on parlera de soudage froid car la chaleur dissipée par le frottement entre l'outil et les plaques ainsi que le malaxage de la matière n'induiront pas des températures très élevées dans les pièces ; la température sera plus faible, comparativement à un soudage optimal. Au contraire, si ce rapport est faible, on parlera de soudage chaud car le malaxage et la chaleur dissipée par frottement seront élevés et engendreront de fortes températures.

On peut aussi mentionner la dissolution de la couche d'alumine au sein du métal pâteux lorsque la configuration de soudage (vitesse de soudage et rotation de l'outil) est optimale. Dans le cas contraire, des petits éléments de cette couche d'alumine sont observables au niveau du cordon.

II.2.3. Lient entre la vitesse de rotation et la vitesse d'avance

Le rapport des vitesses aussi appelé l'avance de l'outil est un facteur important lors de l'analyse des résultats. Ce rapport « k » représente le nombre de tours faits par l'outil sur une distance de d mm et est défini comme suit :

$$k = \frac{\text{vitessederotation [RPM]}}{\text{vitessed'avance}[\frac{mm}{s}]} = [\text{tours/mm}]$$

Il est connu que pour un ratio de vitesses « k » élevé (k = vitesse rotation/vitesse d'avance), la chaleur générée est plus importante et les températures atteintes sont plus près de la température de fusion du matériau. La zone affectée thermiquement(ZAT) est ainsi plus large et apporte une baisse des propriétés du matériau sur une plus grande section.

À l'inverse, un ratio « k » trop faible réduit les températures atteintes dans le matériau mais rend le malaxage de la matière plus difficile et produit souvent des défauts dans la zone

Chapitre II : Modélisation du procédé du soudage par friction et malaxage

soudée. Le ratio optimal est donc celui qui provoque la moins grande augmentation de température tout en étant assez élevé pour assurer un malaxage adéquat de la matière.

Influence de la forme de l'outil

Dans cette section, nous rapportons les résultats d'une étude de ([36]Zhao et al., 2005) sur la qualité du joint soudé en fonction de l'outil utilisé. Lors de cette étude quatre outils ont été utilisés : le premier avec un pion cylindrique fileté, le second avec un pion cylindrique lisse, le troisième avec un pion conique fileté et le quatrième avec un pion conique lisse. Ainsi, il est possible de tester l'influence du filetage et de la forme du pion, les autres dimensions étant constantes d'un outil à l'autre. Il est apparu dans cette étude que l'outil avec le pion conique fileté donne la meilleure qualité de joint. Au un défaut majeur n'est apparu dans le cordon de soudure, le malaxage obtenu avec cet outil est meilleur qu'avec les trois autres, au sens où la texture du noyau soudé est la plus homogène possible. En fin, les propriétés mécaniques sont meilleures pour un tel joint ; ces propriétés ont été testées sur des essais de traction et flexion.



Figure II.3 Type classique d'outil du TWT [24]

De plus, l'absence de filetage provoque des défauts (cavités) au niveau de la transition entre la zone affectée thermo mécaniquement et le noyau soudé ; ces défauts apparaissent généralement du côté de la zone d'attaque car la matière ne fait pas complètement le tour de l'outil ce qui provoque des manques de matière à ce niveau. En fin, les filets génèrent une quantité de chaleur plus importante ce qui permet d'améliorer le malaxage de la matière.

Outre ce travail, de nombreuses recherches expérimentales sont menées dans le but d'améliorer la forme de l'outil afin d'obtenir un malaxage optimal. Plusieurs formes d'outils sont testées: cylindriques, coniques, lisses, filetés, à cannelures (Trivex), en forme de prisme à base rectangulaire (Triflat),...

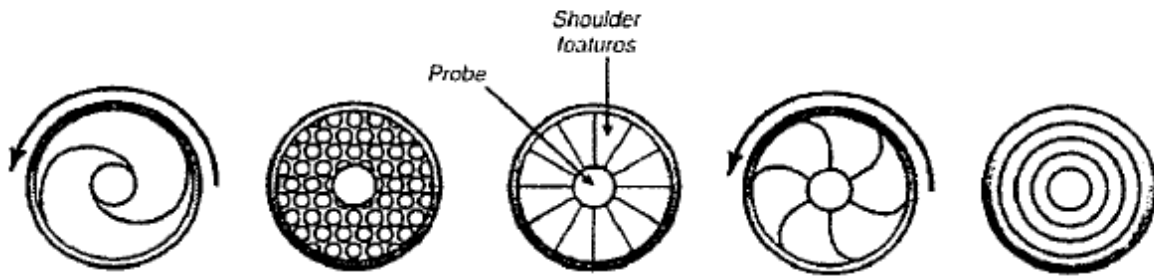


Figure II.4 Différentes géométries d'épaulement [16]

II.2.4. Lient entre la vitesse de rotation et l'épaulement f_q

$$f_q = 2\pi\mu p_n r N$$

Où r est la distance radiale à partir de l'axe de rotation de l'outil, N la vitesse angulaire, μ le coefficient de friction et p_n la force normale.

II.3. Les performances

II.3.1. Les défauts dans un cordon FSW





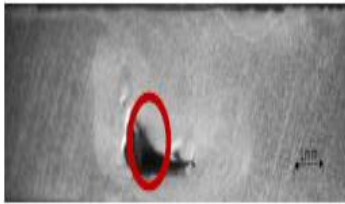
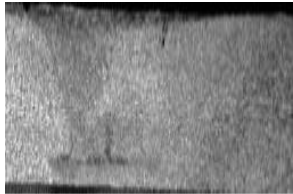
Un cordon de soudure FSW peut comprendre un ou plusieurs types de défauts. L'origine de ces défauts n'est pas encore parfaitement connue. Les défauts peuvent être causés par un mauvais choix d'un ou plusieurs paramètres. Comme les défauts géométriques ces défauts sont indépendants du malaxage, ils peuvent être définis comme étant des défauts relatifs au positionnement de l'outil.

La connaissance industrielle et l'expérience peuvent aider à limiter ces défauts et non encore à les éliminer.

Ces défauts dépendent dans plusieurs cas de figure des différentes variables opératoires, d'où la nécessité de passer par un plan d'expérience pour choisir les paramètres opératoires les plus efficaces répondant à une qualité satisfaisante d'un point de vue industriel. Le tableau suivant présente les défauts rencontrés lors du soudage par friction malaxage.

Chapitre II : Modélisation du procédé du soudage par friction et malaxage

Tableau II.2 Types de défauts présents au niveau d'un joint FSW.

Type de défaut	Brulure (surface)	Ecaillage (surface)	Bavure (surface)
Matériau 2024-T3			
Type de défaut	Tunnel apparent à la surface	Tunnel au cœur du cordon	Manque de pénétration
Matériau 2024-T3		 Coupe transversale	 Coupe transversale

II.3.2. Tentative d'éliminations des défauts

Les brulures sont le résultat d'un grand apport de chaleur donc un rapport ($r = \text{vitesse de rotation/vitesse de soudage}$) trop élevé. Pour maîtriser ce défaut et l'éviter il faut diminuer ce rapport.

Le manque de pénétration comme l'indique son nom est dû au fait que le pion n'atteint pas le fond de la tôle. Ce défaut est dû à un mauvais choix de la géométrie de l'outil, mal approprié à l'épaisseur de la tôle.

Pour le problème de mauvaise pénétration il existe plusieurs remèdes pour éviter le défaut de type tunnel : modifier la géométrie de l'outil (ajout de rainure, filetage...) [25], augmenter l'effort de soudage [26], ou bien encore modifier l'inclinaison de l'outil pour éliminer l'oxyde il est conseillé d'appliquer un décapage mécanique ou chimique sur la surface supérieure de la tôle juste avant le soudage. Un film d'oxyde de très faible épaisseur, peut disparaître vu sa fragilité, lors du passage de l'outil.

Les bavures ou « flash » sont dus à un apport de chaleur intense lié à un important effort de soudage ou parfois à une pénétration importante.

Chapitre II : Modélisation du procédé du soudage par friction et malaxage

Les défauts peuvent aussi survenir par un mauvais choix de l'épaulement qui ne permet pas de renfermer la matière autour du pion (un épaulement conique peut éliminer ce défaut).

Les stries à la surface, elles sont généralement liées à la rigidité de l'outil et de la machine. Dans la plupart des cas elles ne sont pas traitées comme défaut mais comme un résultat lié nécessairement au procédé [25].

II.3.3. Lient entre les paramètres de l'outil et l'angle d'inclinaison α

Dans le paragraphe suivant nous présentons une méthode de calcul pour estimer le choix de l'angle d'inclinaison α [25]

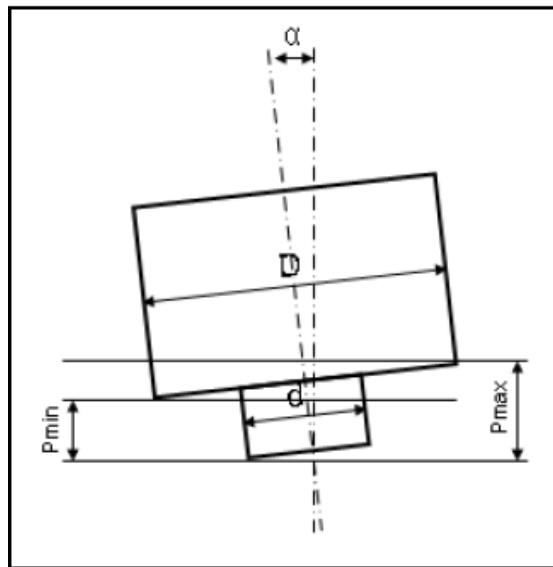


Figure II.5 Positionnement de l'outil

Condition d'utilisation d'un outil avec un angle fixe : $P_{min} \leq P \leq P_{max}$

$$P_{min} = l_p \cos \alpha - \frac{D - d}{2} \sin \alpha$$

$$P_{max} = l_p \cos \alpha + \frac{D + d}{2} \sin \alpha$$

Avec l_p : longueur du pion, D : diamètre de l'épaulement, d : diamètre du pion et α : angle d'inclinaison.

Pour obtenir une estimation sur l'angle maximal à ne pas dépasser et assurer la condition de contact entre l'épaulement et l'outil, on peut calculer l'angle maximal en fonction du diamètre de l'épaulement, de la longueur et du diamètre du pion, avec la condition suivante :

$$l_p \cos a + \frac{D + d}{2} \sin a \geq e$$

$$l_p \cos a_{max} + \frac{D + d}{2} \sin a_{max} = e$$

Pour résoudre cette équation on effectue le changement suivant :

$$t = \tan \frac{a}{2} \quad , \quad \cos a = \frac{1-t^2}{1+t^2} \quad , \quad \sin a = \frac{2t}{1+t^2}$$

L'équation devient :

$$l_p \left(\frac{1-t^2}{1+t^2} \right) + \frac{D+d}{2} \left(\frac{2t}{1+t^2} \right) = e$$

Après simplification, on obtient l'équation du second degré suivante :

$$-(l_p + e)t^2 + (D + d)t + l_p - e = 0$$

$$\alpha_{max} = \sup |2 * \tan^{-1} t|$$

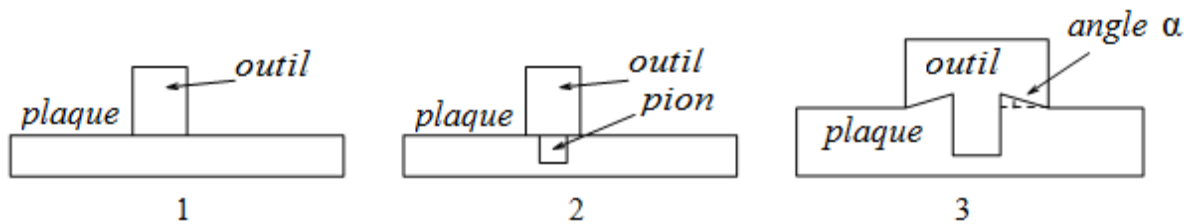


Figure II.6 Choix de la zone de contact entre l'outil et la matière.

II.3.4. La vibration de l'outil

D'autres critères sont à prendre en compte lors du choix du point de fonctionnement tel que la durée de vie de l'outil.

Ce dernier doit présenter une grande résistance à la flexion, compte tenu des vibrations générées par les efforts de soudage. Une valeur critique de vibration peut causer l'endommagement de l'outil et sa rupture. L'usure de l'outil s'accélère avec l'augmentation de la vitesse d'avance et la vitesse de rotation, à cause des hautes températures atteintes.

La vibration de l'outil est due à l'interaction outil/matière.

L'avance par tour (V_a/N) est la distance parcourue par l'axe de l'outil pendant une rotation complète.

Chapitre II : Modélisation du procédé du soudage par friction et malaxage

Pour différent rapport (V_a/N), on sait que le pas est égal à l'avance par tour. Le pas est la distance entre deux creux ou deux pics du profil de la face supérieure du cordon.

Le profil des stries est déterminé par la trajectoire du plus bas point de l'épaulement. Si on considère la trajectoire d'un point A situé sur l'arrêt de l'épaulement qui occupe le plus bas point dans la matière, la projection de l'épaulement sur le plan de la plaque est une ellipse d'excentricité $ex = \cos a$ donc on a $ex = \cos a \frac{r_1}{r_2}$ soit $r_1 = R$ donc $r_2 = R \cos a$

L'équation paramétrique du mouvement d'un point situé sur l'outil exprimé dans le plan (x, y) est définie comme suit : talque v_a est la vitesse d'avance de l'outil

$$x = R \sin(\omega t) + V_a \cdot t \quad \text{et} \quad y = R \cos a \sin(\omega t)$$

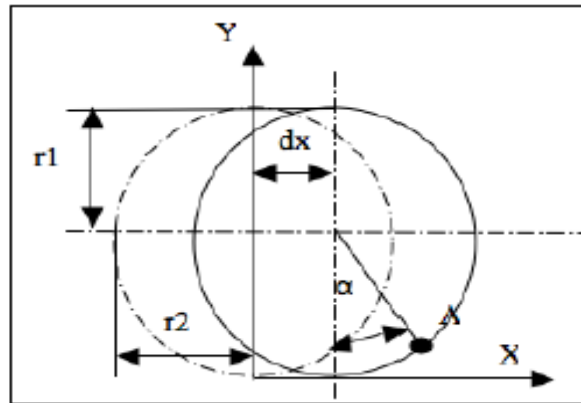


Figure II.7 Trajectoire du point le plus bas et profil des stries surface supérieure du joint

La morphologie laissée par l'outil au niveau de la face supérieure est facteur de plusieurs paramètres, Cette morphologie est à prendre en compte lors du soudage en FSW et plus en amont lors de la conception de l'outil [27]. Cette morphologie est caractérisée par des stries. L'analyse des stries permet de comprendre leurs formations. Nous avons observé que la périodicité des stries correspond à l'avance par tour de l'outil. Comme il a été déjà dit, ces stries sont la trace du plus bas point de l'épaulement. Même si l'angle tilt est nul on peut retrouver ces stries à cause des défauts de fabrication de l'outil et de l'interaction outil/matière.

II.3.4.1. Influence de la vitesse de rotation N (tr/min)

Pour étudier l'influence de la vitesse de rotation, il faut fixer les valeurs de la vitesse d'avance et celle de l'effort appliqué. Dans ce cas, la vitesse de rotation prend plusieurs valeurs. Après on va déduire l'influence de ce paramètre sur les qualités mécaniques

Chapitre II : Modélisation du procédé du soudage par friction et malaxage

On peut constater globalement que la vitesse de rotation peu influencer sur la limite élastique (R_e) et la résistance à la rupture (R_t). et la meilleure qualité mécanique du soudage [26].

II.3.4.2. Influence de la vitesse d'avance V_a (mm/min)

Ce paramètre important dans l'apport de l'énergie thermique conditionne le cycle thermique du joint FSW, et le comportement mécanique (l'allongement).

II.3.4.3. Influence de l'effort de forgeage $F(N)$

L'effort de forgeage (axial) est un paramètre important en FSW. A mesure que la charge axiale augmente, la pression hydrostatique entre l'outil et la matière augmente, de ce fait la température de soudage augmente et favorise l'écoulement de la matière autour du pion. Selon Kumar [26] il existe une charge axiale optimale qui donne des meilleures résistances à la traction. Ce facteur n'influe que légèrement sur R_e et R_m et l'allongement $A\%$ [26].

II.3.5. Les différentes zones du cordon et microstructure

II.3.5.1. La Zone Affectée Thermiquement (ZAT)

La plupart des procédés de soudage entraînent le réchauffement, puis le refroidissement du métal. Ces variations de température ont un impact sur la structure du métal dans la zone soudée. La zone périphérique au bain de fusion, également touchée par cet accroissement de la température, est appelée « Zone Affectée Thermiquement » ou ZAT.

Dans une soudure, la zone problématique est très souvent la zone affectée thermiquement (ZAT), puisqu'un grossissement des grains survient ce qui influence directement les propriétés mécaniques du matériau. Les différentes techniques de soudage tentent le plus possible d'atténuer la ZAT afin que le matériau conserve ses propriétés de base. La diminution de cette zone précise permet d'optimiser le procédé de soudage. Cependant, l'optimisation des paramètres de soudage nécessite de bien comprendre les mécanismes physiques impliqués dans le procédé. Quoiqu'il existe plusieurs publications sur ce sujet, aucunes d'entre elles ne définie clairement quels sont les profils de température,

Chapitre II : Modélisation du procédé du soudage par friction et malaxage

d'écoulement, de contrainte, de déformation et de «malaxage» requis pour obtenir une soudure adéquate ou de qualité supérieure [30].

II.3.5.2. Le cordon

Le cordon FSW peut être divisé en différentes parties, en se basant sur la microstructure du matériau après soudage.

L'Institut de soudure britannique TWI a standardisé ces zones. La forme et la microstructure de ces zones sont discutées dans plusieurs travaux de recherches [28].

La figure suivante montre une macrographie qui présente les différentes zones du cordon obtenu par friction malaxage.

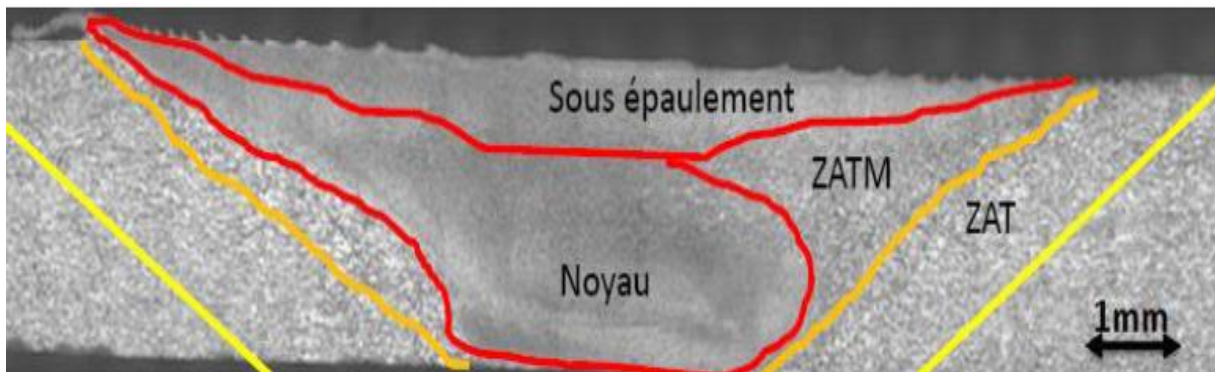


Figure II.8 Les différentes zones du cordon

La soudure se compose principalement de quatre zones suivant la taille des grains et leurs aspects morphologiques. Le joint de soudure FSW n'est pas parfaitement symétrique d'un point de vue morphologique.

Le matériau soudé en FSW subit une transformation métallurgique importante, et présente ainsi différentes zones. Les zones malaxées subissent d'une part un important gradient de chaleur qui s'étend jusqu'aux deux cotés du joint, d'autre part de grandes déformations.

La zone centrale du cordon est affectée par des grandes déformations dues à un mouvement chaotique derrière l'outil.

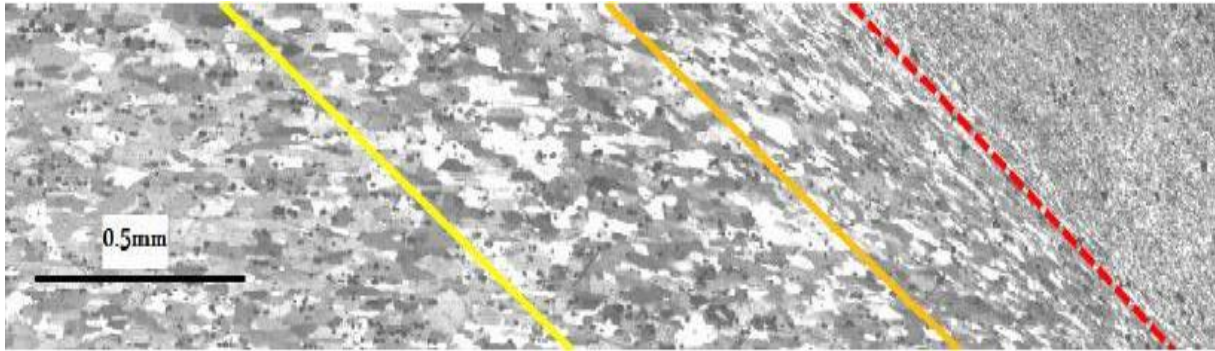


Figure II.9 Limites des zones

La première zone est la plus éloignée du cordon, donc les caractéristiques du métal de base car elle n'a pas subi une élévation de température affectant ses propriétés microstructurales et mécaniques. Cette zone possède une frontière avec une zone dite affectée thermiquement, cette frontière est souvent complexe. Elle est habituellement caractérisée grâce à un changement de taille de grain ou par la variation de dureté entre les deux zones.

La zone affectée thermiquement (ZAT ou HAZ) a subi une élévation de température. Elle est limitée vers le centre par la zone affectée thermo-mécaniquement. Le cycle thermique subi par la ZAT affecte la taille des grains : on assiste à un léger grossissement de la taille des grains dans cette zone. Le gradient de température obtenu lors de l'assemblage peut aussi affecter les caractéristiques de dureté. On assiste à une chute de dureté dans cette zone si l'alliage a été au préalable traité pour avoir une dureté optimisée.

La zone affectée thermo-mécaniquement (ZATM ou TMAZ) se trouve autour du noyau et est limitée par la frontière de la zone affectée thermiquement. Elle subit des grandes déformations qui provoquent un changement d'orientation des grains par rapport à la direction initiale du laminage [29].

II.3.5.3. Température de soudage

Pour modéliser la température de soudage en applique le modèle numérique et l'équation utilisée pour calculer une quantité quelconque $f(x)$ est donnée par la forme suivante qui utilise une approximation par intégrale selon le développement de Liu et Liu [14]:

$$f(x) = \int f(\hat{x})w(x - \hat{x}, h)d\hat{x} \\ \cong \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(x_j)w_{ij}$$

Où $w_{ij} = w(x_i - x_j, h)$ correspond à la fonction de kernel (h est la longueur de lissage)

II.3.5.4. Modèle de comportement

Afin de représenter le comportement du matériau, le modèle de Johnson-Cook utilisé dans le cas où les paramètres associés à (l'alliage) sont disponibles dans la littérature [31] et pour son adaptation au taux de déformation élevé à haute température. La formulation du modèle de Johnson- Cook est représentée comme suit:

$$\sigma = (A + B\varepsilon_e^r) \left(1 + C \ln \dot{\varepsilon}_0 \left(\frac{\dot{\varepsilon}_e}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right) [1 - T^t]$$

Où les variables A, B, C, r, et ε_0 sont des paramètres du matériau, et σ c'est le Coefficient de glissement, $\dot{\varepsilon}_0$ Constante du matériau s^{-1} , $\dot{\varepsilon}_e$ Taux de déformation effectif (s^{-1}) et ε_e Déformation effective (m/m) et $T_t = \frac{T - T_\infty}{T_F - T_\infty}$ représente la température au temps t(s) telle que T_∞ (K) est la température du milieu ambiant et T_F (K) est la température de fusion du métal. La première parenthèse de l'équation 3 correspond aux déformations, la deuxième au taux de déformation alors que la troisième est associée à la température.

L'un des avantages de la méthode SPH est de pouvoir tenir compte de l'évolution des propriétés des matériaux avec la température. Des équations empiriques ont donc été créées et implantées dans le code numérique développé à partir des données de la littérature [32-33] pour calculer certaines propriétés du matériau utilisé. Le tableau 1 présente les équations utilisées pour l'alliage de l'aluminium AA6061-T6

Tableau II.3 Équations de variation des propriétés en fonction de la température [30]

Densité (kg/m ²)	P=-0.228 θ +2696.9
Conductivité thermique (w/mk)	K=0.153 θ +164.8
Capacité thermique (kj/kgk)	C _P =0.525 θ +932.7
Module de young (Gpa)	E=-3960 θ^2 +8.1e ⁴ θ^2 -5.8 e ⁷ θ +6.7 e ¹⁰

$\theta = T - T_\infty$ telle que T_∞ est la température de référence fixée à 300 Kelvins. Ces équations sont valides pour $0 < \theta < 455$. Dans le cas où la température descend en bas de 300 K ($\theta = 0$) ou montent au dessus de 728 K ($\theta = 455$), les valeurs minimales et maximales sont respectivement choisies et demeurent constantes.

II.3.5.5. Modèle de friction

Un modèle de friction est requis pour évaluer adéquatement les contraintes de cisaillement et l'écoulement du matériau pour les simulations solides. En effet, ce sont les forces de friction entre l'outil et les plaques qui provoquent l'écoulement rotatif sans lequel la soudure ne pourrait pas être créée. Ainsi, le premier modèle implanté est le modèle de friction de Coulomb ne variant seulement qu'avec la force normale et le coefficient de friction, soit:

$$\vec{F}_f = \mu P_n \cdot \vec{n}$$

Où F_f est la force de friction, μ le coefficient de friction, P_n la force normale entre les Deux corps et n est le vecteur unitaire indiquant la direction où la force de friction est Appliquée. Ce modèle simpliste a été choisi pour vérifier la viabilité d'un modèle de friction dans le code SPH [30, 24].

II.3.5.6. Modèle de génération de chaleur

Basée sur le modèle d'Arora [37] et Hamilton [19], la génération de chaleur provient de deux sources distinctes soient des déformations plastiques et de la friction générée entre l'outil et les plaques. Par contre, le programme SPH tient déjà compte de la chaleur générée par les déformations plastiques. Ainsi, seule la chaleur provoquée par la friction a été ajoutée selon le modèle de ces deux auteurs. D'autre part, les forces de friction déterminées ci-dessus augmentent les déformations plastiques qui sont ensuite converties en chaleur. Il n'est donc pas requis d'ajouter un calcul spécialement pour ces déformations. L'équation de génération de chaleur développée est la suivante:

$$q = \delta(1 - \gamma)\vec{F}_f \cdot \vec{v}_{rel}$$

Tel que F_f est la force de friction calculée par l'équation précédente, v_{rel} est la vitesse relative entre les deux particules, q est la chaleur produite sur une particule et provoquée par la friction avec toutes les particules environnantes à celle-ci et finalement, δ et γ sont des coefficients de pondération empiriques basés sur les essais expérimentaux.

II.4. Méthodes de modélisation

II.4.1. Méthode Taguchi multi-objectif

Une conception de Taguchi, ou une matrice orthogonale, est une méthode simple et robuste de conception d'expériences pour optimiser les paramètres du processus de gouvernance qui nécessite habituellement seulement une fraction des combinaisons factorielles complètes. Cette technique permet à chaque facteur d'être évalué indépendamment avec des expériences aléatoires en raison de la matrice orthogonale (MO) consistant en une conception équilibrée avec des niveaux de facteur également pondérés éliminant ainsi la possibilité d'un facteur effectuant l'estimation d'un autre facteur. La possibilité de réduire la gamme d'étude spécifique ou d'identifier des problèmes dans le processus de fabrication avec des données existantes en soulignant une valeur de performance moyenne proche de la valeur cible plutôt qu'une valeur dans certaines limites de spécification a fait de la méthode Taguchi un choix populaire pour améliorer qualité du produit [17, 20-22].

II.4.1.1. Développement d'un modèle mathématique

Dans une conception de paramètre robuste typique, la première étape consiste à choisir les facteurs de contrôle affectant le processus et leurs niveaux avec sélection subséquente d'un réseau orthogonal approprié pour les facteurs de contrôle choisis tout en déterminant simultanément un ensemble de facteurs de bruit nécessaires avec des conceptions expérimentales appropriées. Les facteurs de contrôle comprennent le réseau interne tandis que les facteurs de bruit comprennent le réseau externe. Le choix de (MO) appropriée est basé sur le degré de liberté total (DLT) qui est calculé comme [24] :

$$DLT = \{(a - 1)n\} + \{(A - 1)(B - 1)n_i + 1\}$$

Où a est le nombre de niveaux, n est le nombre de facteurs, et n_i est le nombre d'interactions alors que A et B sont les facteurs de contrôle en interaction.

En général, le rapport signal sur bruit (S / B) (η , dB) indique des caractéristiques de qualité pour les données obtenues dans le plan d'expériences de Taguchi et peut être calculé mathématiquement comme [24]:

$$\eta = -10 \log[EQM]$$

Chapitre II : Modélisation du procédé du soudage par friction et malaxage

Où EQM est un écart quadratique moyen par rapport à la valeur désirée et communément appelé fonction de perte de qualité. Habituellement, il y a trois catégories de caractéristiques de qualité dans l'analyse du rapport signal / bruit, qui sont les suivantes: plus petit est meilleur, plus haut est meilleur et nominal meilleur.

Dans cette étude, le plus haut est utilisé pour les trois objectifs, à savoir la résistance à la traction, le profil de dureté de la zone de pépite et la classe de qualité de la soudure. La dureté de la zone des pépites qui a une grande influence sur le cycle de vie en fatigue des alliages d'aluminium est directement proportionnelle à la résistance à la traction des joints [15].

LeEQM utilisant le plus haut est le meilleur a été calculé en utilisant les équations suivantes:

$$\text{Plus c'est mieux} = \eta = -10 \left[\log \left(\frac{\sum Y^2}{n} \right) \right]$$

Où y est les réponses pour la combinaison de niveaux de facteurs donnée et n est le nombre de réponses dans la combinaison de niveaux de facteurs. En obtenant l'estimation du rapport S / B, les paramètres déterminants avec l'ensemble idéal de paramètres de processus peuvent être déterminés.

L'analyse successivement de la variance (ANOVA) sera utilisée pour analyser l'effet relatif des différents paramètres ou facteurs. Cette méthode statistique estime quantitativement les facteurs de significativité relative sur les caractéristiques de qualité [18, 24]. Un facteur spécifique est considéré comme statistiquement significatif si la valeur p est inférieure au niveau de signification (α) alors que le F-ratio ou un pourcentage de contribution représente l'importance des facteurs. Une valeur plus élevée du rapport F indique un changement important de la performance du processus par la variation du paramètre de processus respectif alors que le rapport de p inférieur à 0,05, le plus significatif sera le facteur.

Dans l'optimisation multi-objectif, un rapport S / B global unique pour toutes les caractéristiques de qualité est calculé à la place de rapports S / B distincts pour chacune des caractéristiques de qualité. Ce rapport S / B global est connu sous le nom de rapport S / B multiple (MSNR). Le MSBR pour j, (η_j^e) est calculé comme suit [23]:

$$\eta_j^e = -10 \log_{10} (Y_j)$$

$$Y_j = \sum_{i=1}^k w_i y_{ij}$$

$$y_{ij} = \frac{L_{ij}}{L_{i*}}$$

Où y_j est la perte de qualité totale normalisée en j , w_i représente le facteur de pondération pour la caractéristique de qualité i , k est le nombre total de caractéristiques de qualité et y_{ij} est la perte de qualité normalisée associée à la caractéristique de qualité i à la j condition d'essai, L_{ij} est la perte de qualité ou EQM pour la caractéristique de qualité i au j , et L_{i*} est la perte de qualité maximale pour la i caractéristique de qualité parmi tous les essais expérimentaux.

II.4.2. Méthodologie de surface de réponse

Le développement de modèles physiques appropriés pour les FSW qui peuvent anticiper les processus caractéristiques principales est une préoccupation cruciale. Ainsi, les chercheurs attirent le développement des modèles basés sur des modèles empiriques. À cet égard, la méthodologie de surface de réponse (MSR) est une méthode pratique d'analyser, améliorer et optimiser les structures sur le domaine réalisable des paramètres. Cette méthode est une collection de techniques statistiques et mathématiques dans lesquelles une réponse d'intérêt est influencée par plusieurs variables [34].

II.4.2.1. Développement d'un modèle mathématique

A partir de la méthodologie de surface de réponse, on peut déterminer un modèle mathématique qui est compatible avec les résultats, donc on doit établir une relation entre les paramètres d'entrée (x_1, x_2, x_3) les paramètres de soudage choisis, et le paramètre de sortie Y . Sans tenir des interactions entre les paramètres de soudage, le modèle prend la forme :

$$Y = K \cdot x_1^n \cdot x_2^m \cdot x_3^p$$

K, n, m, p sont des constantes. Ce modèle est déterminé après une linéarisation par une transformation logarithmique.

$$\ln(Y) = \ln(k) + n \ln(x_1) + m \ln(x_2) + p \ln(x_3)$$

De même, ce modèle peut se représenter par cette équation :

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3$$

Chapitre II : Modélisation du procédé du soudage par friction et malaxage

(x_1 , x_2 et x_3) sont des paramètres logarithmique d'entrées, respectivement b_0 , b_1 , b_2 et b_3 sont des coefficients qui les correspond.

- L'équation d'une sortie (z) tel que les entrées c'est (N , V_a , L),

En générale :

$$y = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ij} x_i^2 + \sum b_{ij} x_i x_j + e_r$$

Et pour trois facteurs, le polynôme sélectionné pourrait être exprimé comme

$$z = b_0 + b_1(N) + b_2(V_a) + b_3(L) + b_{11}(N^2) + b_{22}(V_a^2) + b_{33}(L^2) + b_{12}(NV_a) + b_{13}(NL) + b_{23}(V_a L)$$

II.5. Le coût et le temps

II.5.1. Temps du soudage unitaire

$$T_s = T_p + T_\epsilon + \frac{NR}{V_a} + T_{ex} + \frac{T_o}{n} + \frac{T_p \times T_{ch}}{T_{Dv}} + \frac{T_\epsilon \times T_{ch}}{T_{Dv}}$$

Pour une modélisation opération du soudage, il faut étendre encore l'expression du modèle de la durée de vie d'outil T_{Dv} . Nous allons donc ajouter le diamètre d'épaulement (D) et le diamètre du pion (d) et l'angle d'inclinaison (α) afin d'avoir un modèle général convenable pour la modélisation du procédé du soudage.

$$T_{Dv} = \frac{k}{V_a^\gamma N^\beta \alpha^r w^\lambda}$$

$k, \gamma, \beta, \text{ et } \lambda$. Sont des constantes

Les temps du soudage T_p durant l'opération se calculent ainsi :

$$T_p = \frac{LWH - (W - D)L\theta - HLD}{d\alpha_r V_a}$$

$$T_\epsilon = \frac{WL}{D N}$$

$$T_s = \frac{LWH - (W - D)L\alpha - HLD}{d\alpha_r V_a} + \frac{WL}{DN} + \frac{NR}{V_a} + T_{ex} + \frac{T_o}{n} + \frac{LWH - (W - D)L\alpha - HLD}{D\alpha_r V_a} \times \frac{T_{ch}}{\left(\frac{k}{V_a^\gamma N^\beta \alpha^r w^\lambda}\right)} + \frac{WL}{DN}$$

Chapitre II : Modélisation du procédé du soudage par friction et malaxage

T_p, T_ϵ : temps du soudage durant l'opération (pénétration, échauffement) (min)

T_{Dv} : durée de vie de l'outil (min)

T_{ch} : temps pour changer l'outil inutile (min)

T_{ex} : temps d'exécution (min)

T_o : temps de mise en course pour l'opération (min)

T_s : temps du soudage unitaire (min)

V_a, N : vitesse d'avance (mm/min) et vitesse de rotation (tr/min)

H : hauteur du volume à souder (zone de malaxage) (mm)

L : longueur du volume à souder (zone de malaxage) (mm)

D : diamètre d'épaulement (mm)

n : nombre de plaques (pièces) à souder

d : diamètre du pion (mm)

R : longueur de joint (mm)

w : largeur de joint (mm)

II.5.2. Coût du soudage

L'équation générale des coûts de production (C) comme suite :

$$C = C_B + k_o T_s + C_{Hr} T_{Dv} + C_{Hf} T_\epsilon$$

Les coûts horaires des outils, C_{Hr} et C_{Hf} , sont calculés en utilisant la durée de vie T_{Dv} , le coût d'achat initial C_p , le coût de l'opération C_A , et le nombre de fois que l'outil peut être utilisé n_u :

$$C_{Hr} = \frac{C_{pr} + (C_A + n_{ur})}{T_{Dv}(n_{ur} + 1)}$$

$$C = C_B + k_o T_s + \frac{C_{pr} + (C_A + n_{ur})}{T_{Dv}(n_{ur} + 1)} \times \frac{LWH - (W - D)L\alpha - HLD}{d\alpha_r V_a} + \frac{C_{pf} + (C_A + n_{uf})}{T_{Dv}(n_{urf} + 1)} \times \frac{WL}{D_f N_f}$$

Chapitre II : Modélisation du procédé du soudage par friction et malaxage

C_A : Coût d'aiguisage de l'outil(\$)

C_{Hr}, C_{Hf} : Coût horaire de l'outil (\$/min)

C_{pr} : Coût d'achat de l'outil (\$/outil)

C_B : Coût du matériel brut (\$)

k_o : Coût d'opération, incluant salaire et machine (\$/min)

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons concluons que les paramètres de l'outil influer direct sur les vitesses (N, V_a) et aussi sur le matériau , les erreurs dans le processus FSW ne proviennent pas souvent des paramètres de l'outil, mais dans le cas où le pion ne pénètre pas complètement les plaques cela est dû à la mauvaise sélection de l'outil. Les brulures et les déformations se fait à la mauvaise sélection de ($r = N/V_a$)et produisent ainsi une température élevée qui se traduit par une mauvaise qualité du soudage, afin de minimiser ces erreurs, nous avons modélisé différents paramètres et réponses avec les méthodes (taguchi et surface de réponses).

Nous avons conclu que les méthodologies (Taguchi et surface de réponses) sont les meilleurs et plus simple pour modéliser les performances en fonction des paramètres dans le processus de soudage FSW.

CHAPITRE III :
METHODES ET MODELES
D'OPTIMISATION

Introduction

Les ingénieurs se heurtent quotidiennement à des problèmes technologiques de complexité grandissante, qui surgissent dans des secteurs très divers, comme dans le traitement Des images, la conception de systèmes mécaniques, la recherche opérationnelle et l'électronique.

Le problème à résoudre est souvent exprimé mathématiquement sous la forme d'un système d'équations et d'inégalités.

Les premiers problèmes d'optimisation auraient été formulés par Euclide, au IIIe siècle avant notre ère, dans son ouvrage « HISTORIQUE ELEMENTS ». Trois cent ans plus tard, Héron d'Alexandrie dans Catoptrica énonce le principe du plus court chemin dans le contexte de l'optique. [44]

Au XIIIe siècle, l'apparition du calcul différentiel entraîne l'invention de techniques d'optimisation, ou du moins en fait ressentir la nécessité. Newton met au point une méthode itérative permettant de trouver les extrémums locaux d'une fonction en faisant intervenir la notion de dérivée, issue de ses travaux. Cette nouvelle notion permet de grandes avancées dans l'optimisation des fonctions car le problème est ramené à la recherche des racines de la dérivée [44].

Durant le XVIIIe siècle, les travaux des mathématiciens Euler et Lagrange mènent au calcul des variations, une branche de l'analyse fonctionnelle regroupant plusieurs méthodes d'optimisation. Ce dernier invente une technique d'optimisation sous contraintes: Les multiplicateurs de Lagrange [44].

Le XIXe siècle est marqué par l'intérêt croissant des économistes pour les mathématiques. Ceux-ci mettent en place des modèles économiques qu'il convient d'optimiser, ce qui accélère le développement des mathématiques. Depuis cette période, l'optimisation est devenue un pilier des mathématiques appliquées et le foisonnement des techniques est tel qu'il ne saurait être résumé en quelques lignes [44].

On peut tout de même évoquer l'invention de plusieurs méthodes itératives utilisant le gradient de la fonction, ainsi que l'utilisation du terme programmation mathématique, pour désigner des problèmes d'optimisation [44].

Chapitre III : Méthodes et modèles d'optimisation

Historiquement, le premier terme introduit fut celui de programmation linéaire, inventé par George Dantzig vers 1947. Le terme programmation dans ce contexte ne réfère pas à la programmation informatique (bien que les ordinateurs soient largement utilisés de nos jours pour résoudre des programmes mathématiques). Il vient de l'usage du mot programme par les forces armées américaines pour établir des horaires de formation et des choix logistiques, que Dantzig étudiait à l'époque. L'emploi du terme « programmation » avait également un intérêt pour débloquer des crédits en une époque où la planification devenait une priorité des gouvernements. L'expression programmation mathématique, qui requiert la longue explication ci-dessus, tend à être abandonnée. Par exemple, en juin 2010, la société savante internationale qui représente cette discipline a vu son nom précédent Mathematical Programming Society changé en Mathematical Optimization Society ; pour la même raison, on préfère aujourd'hui utiliser les locutions optimisation linéaire/quadratique/... au lieu de programmation linéaire/quadratique [44].

Dans ce chapitre nous allons présenter les différentes formulations existantes des problèmes d'optimisation à savoir la formulation mono et multi-objectifs avec et sans contraintes, suivi des techniques d'optimisation adaptées à la résolution de chacune des formulations abordées. Ensuite, différents modèles d'optimisation des principales performances du procédé de soudage par friction seront exposés dans la dernière section.

III.1. Optimisation

III.1.1. Optimisation mono-objectif

III.1.1.1. Définition

L'optimisation mono-objectif consiste à résoudre un problème d'optimisation à une seule fonction-objectif sous l'ensemble des contraintes. Ces problèmes peuvent être multi variable ou seul variable. La modélisation générale est tel que :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{minimiser ou maximiser } f(\vec{x}) \\ \vec{g}(\vec{x}) \leq 0 \Leftrightarrow \vec{g}(\vec{x}) = g_i(\vec{x}) \\ \vec{h}(\vec{x}) = 0 \Leftrightarrow \vec{h}(\vec{x}) = h_k(\vec{x}) \\ \min \leq \vec{x} \leq \max \text{ avec } \vec{x} = x_i \\ \text{ansiquex } \in R^i, g(x) \in R^j, h(x) \in R^k \end{array} \right.$$

$f(\vec{x})$: Fonction objectif ou critère d'optimisation.

Chapitre III : Méthodes et modèles d'optimisation

$g_j(\vec{x})$: Contrainte d'inégalité, (j) : c'est le nombre d'inégalité.

$h_k(\vec{x})$: Contrainte d'égalité (k) : c'est le nombre d'égalité.

\vec{x} : La valeur de variable (i) : c'est le nombre de variable.

On peut classer les problèmes d'optimisation selon leurs caractéristiques (par exemple la présence et l'absence des contraintes ou la nature des équations) comme suite:

- Système linéaire.
- Système non linéaire

III.1.1.2. Optimisation des systèmes linéaire

Cette optimisation correspond aux problèmes formés par des équations linéaires, elle est exprimée tel que :

$$[A].\vec{x} - b = 0$$

Toutes les équations soit la fonction objective ou les contraintes sont linéaires.

a- Sans contrainte :

Elle est équation de fonction objective c'est tout, Nous recherchons des solutions approchées pour des systèmes impossibles en résolvant un problème d'approximation des moindres carrés ainsi que conserve les conditions de limitation de variable.

b-Avec contrainte :

La modélisation de problème est telle que :

$$\begin{cases} f(\vec{x}) \text{ fonction objectif} \\ A.\vec{x} - b^* \leq 0 \quad (1) \\ A^*.\vec{x} - b^* = 0 \quad (2) \\ \vec{x}_{min} \leq \vec{x} \leq \vec{x}_{max} \end{cases}$$

(1) contrainte linéaire (inégalité), (2) contrainte linéaire (égalité)

Lorsque nous avons un système linéaire avec contraintes à optimiser bien souvent, et de manière quasi immédiate, nous recourons à la méthode du simplexe. Cette méthode a vu le jour durant la seconde guerre mondiale par Georges Dantzig au sein de l'U.S. Air Force, mais

Chapitre III : Méthodes et modèles d'optimisation

pour des raisons évidentes, il ne publia ses travaux qu'en 1947. Le point d'origine du simplexe est la méthode de Gauss, où Dantzig y applique une stratégie de pivot assez particulière.

III.1.1.3. Optimisation des systèmes non linéaires

Elle étudie le cas général dans lequel l'objectif ou les contraintes (ou les deux) contiennent des parties non-linéaires, éventuellement non-convexes.

La forme générale d'un problème d'optimisation est la suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \min f(x) \\ x \in R^n \\ \text{sous des contraintes} \\ g(x) \leq 0 \\ h(x) = 0 \end{array} \right.$$

Où les fonctions f , g et h sont typiquement non-linéaires.

L'équation désigne ce que nous appelleront des contraintes d'inégalité et l'équation des contraintes d'égalité.

Il va de soi que la plupart des problèmes réels ou industriels ne sont pas initialement sous une des formes proposées. C'est pourquoi un des premiers travaux consiste en général à mettre le problème initial sous une forme standard.

Pour résoudre les problèmes non linéaires nous utilisons les méthodes d'approximation les plus populaires surtout les méthodes déterministes comme la méthode du gradient, méthode de la pénalité intérieure etc.

III.1.1.4. Techniques d'optimisation mono -objectif

Il y a plusieurs méthodes d'optimisation mono objectif, telles les méthodes déterministes :

a) Méthode du simplexe

L'intérêt principale de la méthode du simplexe par rapport aux autres méthodes est qu'elle ne nécessite pas de calcul de gradient, elle est uniquement basée sur l'évolution de fonction, cela rend utilisable pour des fonctions bruitées.

Chapitre III : Méthodes et modèles d'optimisation

Soit une fonction à minimiser. On appelle simplexe de \mathbb{R}^n un ensemble (x_0, x_1, \dots, x_n) de point de \mathbb{R} tel que $f(x_0) \geq f(x_i) \forall i \in [1, \dots, n]$, donc x_0 est le meilleur élément et $f(x_0)$ est la valeur optimale

b) Méthode du gradient

Historiquement, les méthodes de gradient sont les plus anciennes, elles permettent de résoudre des problèmes non linéaires et sont basées sur une hypothèse forte ;

La connaissance de la dérivée de la fonction-objectif en chacun des points de l'espace. Cette famille des méthodes procède de la façon suivante : On choisit un point de départ x_0 et on calcule le gradient $\nabla f(x_0)$ en x_0 . Ce gradient indique la direction de plus grande augmentation de f . On se déplace d'une quantité λ_0 dans le sens opposé au gradient et on définit le point x_1 :

$$x_1 = x_0 - \lambda_0 \frac{\nabla f(x_0)}{\|\nabla f(x_0)\|}$$

Cette procédure est répétée et engendre les points x_0, x_1, \dots, x_k ainsi pas à pas la distance entre le point d'indice k et l'optimum diminue.

$$x_{k+1} = x_k - \lambda_k \frac{\nabla f(x_k)}{\|\nabla f(x_k)\|}$$

λ_k est le pas de déplacement à chaque itération.

c) Méthode de pénalité

Le but des méthodes de pénalité est de résoudre un problème d'optimisation mono objectif de façon approchée. L'algorithme de cette méthode est comme suit:

- Soit le problème P :

$$\text{Min } f(x)$$

- Sans contrainte :

$$g(x) \leq 0$$

- pour $k=1, 2, 3, \dots$ on définit

$$F^k(x) = f(x) + \frac{k}{2\|g(x)\|^2}$$

Chapitre III : Méthodes et modèles d'optimisation

On a :

x^* est minimum local de problème

Le terme $\frac{k}{2} \|g(x)\|^2$ est le terme de pénalité.

La suite $\nabla F^k(x^k) \rightarrow x^*$

$$\nabla f(x^k) + k \nabla g(x^k) g(x^k)$$

x^k est à l'intérieur de S pour k suffisamment grand. Donc x^k est solution du problème avec contrainte pour k suffisamment grand.

III.1.2. Optimisation multi-objectif

III.1.2.1. Définition

Un problème multi objectif ou multicritère peut être défini comme un problème dont, on recherche l'action qui satisfait un ensemble des contraintes et optimise un vecteur de fonction-objectifs.

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$$

Avec x_i les variable du problème et n est le nombre de ces variables.

Les contraintes seront notées :

$g_i(x)$ avec $i=1, \dots, m$, avec m le nombre des contraintes.

Le vecteur de fonction objectif sera noté f :

$$f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x))$$

Avec f_i les objectifs ou critères de décision et k le nombre d'objectif.

Nous considérons que les objectifs sont des fonctions à minimiser, Un problème d'optimisation recherche l'action x^* telle que les contraintes $g_i(x^*)$ soient satisfaites pour

$i=1, \dots, m$, et qu'elle optimise la fonction f :

$$f(x^*) = (f_1(x^*), f_2(x^*), \dots, f_k(x^*))$$

Chapitre III : Méthodes et modèles d'optimisation

III.1.2.2. Méthodes d'optimisation multi-objective

a. Approche par ε -contraintes

Cette méthode est basée sur la minimisation d'un objectif f_i en considérant que les autres objectifs f_j avec j différent de i doivent être inférieurs à une valeur ε_j .

En générale, l'objectif choisi est celui que le décideur souhaite optimiser en priorité

$$\text{Min } f_i(x) \text{ avec } f_j(x) \leq \varepsilon_j, \forall j \neq i$$

De cette manière, le problème multi objectif sera traduit par un problème simple objectif sous contraintes qu'on peut le résoudre. Le décideur peut ensuite réitérer ce processus sur un objectif différent jusqu'à ce qu'il trouve une solution satisfaisante.

b. Méthode min-max

Cette méthode consiste à transformer le problème multi objectif en un problème à un seul objectif où l'on cherche à minimiser le maximum de l'écart relatif entre le point de référence appelé but et un autre point but associé par le décideur, on peut écrire la distance entre le but et l'autre point comme suit :

$$L_r(\vec{f}(\vec{x})) = \left[\sum_{i=1}^m |B_i - f_i(\vec{x})|^r \right]^{\frac{1}{r}}$$

Avec $i=1, \dots, m$

B_i le but à pour le $i^{\text{ème}}$ objectif

Selon l'indice r il y a plusieurs normes, le plus utilisé en méthode min-max est :

$$L_\infty = \max_{i \in \{1, \dots, m\}} [B_i - f_i(\vec{x})]$$

c. But à atteindre

Cette approche, comme celle de min-max, utilise un point de référence pour guider la recherche. Mais elle introduit aussi une direction de recherche, si bien que le processus de résolution devra suivre cette direction. A la différence de l'approche min-max, qui utilise des normes pour formaliser la distance au point de référence, l'approche du but à atteindre utilise des contraintes, à l'instar de l'approche ε -contrainte, pour déterminer la position du point de référence (auss appelé le but). L'écart par rapport à ce but est contrôlé grâce à la variable λ introduite à cet effet :

Chapitre III : Méthodes et modèles d'optimisation

$$\begin{cases} \text{minimiser } \lambda \\ \text{telque } f_i(\vec{x}) - \alpha_i \lambda \leq B_i \\ \text{telque } \vec{g}(\vec{x}) \leq 0 \end{cases}$$

Ainsi en minimisant λ et en vérifiant toutes les contraintes, la recherche va s'orienter vers le but B et s'arrêter sur un point faisant partie de la surface de compromis. Cependant, cette approche, comme les précédentes, doit être itérée plusieurs fois dans le but d'obtenir un ensemble de points optimaux. Les paramètres α_i et B_i doivent être bien choisis par l'utilisateur. Bien que ces paramètres permettent une grande flexibilité de la recherche (orientation et but), s'ils sont mal choisis, ils peuvent, dans certains cas extrêmes, donner des résultats non cohérents.

d. Agrégation des objectifs

Cette méthode consiste à ramener le problème multicritère à un problème d'optimisation d'une combinaison linéaire des objectifs initiaux, en affectant un coefficient de poids. Les coefficients sont généralement choisis en fonction de l'importance relative des objectifs.

Soit:

$$\begin{cases} \text{minimiser } f_{eq}(\vec{x}) = \sum_{i=1}^k w_i f_i(\vec{x}) \\ g(\vec{x}) \leq 0 \\ h(\vec{x}) = 0 \end{cases}$$

On à

$$\vec{x} \in R^n, g(\vec{x}) \in R^m \text{ et } h(\vec{x}) \in R^p$$

Fréquemment les coefficients de pondération respectent la relation suivante :

$w_i \geq 0$ Pour tout les $i \in \{1, 2, \dots, k\}$

$$\sum_{i=1}^k w_i = 1$$

III.2. L'algorithme génétique

III.2.1. Définition

L'algorithme génétique (AG) est un algorithme de recherche basé sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique.

Chapitre III : Méthodes et modèles d'optimisation

L'algorithme génétique de base comporte trois opérations simples qui ne sont pas plus compliquées que des opérations algébriques :

- Sélection
- Reproduction
- Mutation
- L'algorithme génétique fut développé par Holland [41].

III.2.2. Codage d'individus

Avant de passer à l'explication des différents processus génétiques, il faut tout d'abord expliquer le codage des individus.

Exemple : Soit un vecteur \bar{x} composé de trois paramètres x_1 , x_2 et x_3 , codés à 4 bits.

$$\begin{cases} x_1 = 0011 \\ x_2 = 1010 \\ x_3 = 0100 \end{cases}$$

La séquence totale serait la suivante :

$$\bar{x} = \left\{ \begin{array}{c|c|c} x_1 & x_2 & x_3 \\ \hline 0011 & 1010 & 0100 \end{array} \right\}$$

Un chiffre codé en binaire dans ce cas ne représente pas une valeur spécifique mais plutôt un intervalle.

III.2.3. Opérateurs génétiques

Sélection : processus où les individus sont copiés selon la valeur de leur fonction objective f . On peut décrire la fonction f comme une mesure de profit, utilité ou qualité que l'on veut maximiser (minimiser).

Reproduction : processus où de nouveaux individus sont formés à partir de parents. Ces nouveaux individus, les rejetons, sont formés en effectuant un croisement entre deux parents.

Exemple : Soit $k = 4$ pour deux parents (P_1 et P_2) codés à 5 bits (donc $l = 5$). Les rejetons sont O_1 et O_2 .

$$\begin{array}{l} P_1 = 0110|1 \quad O_1 = 01100 \\ P_2 = 1100|0 \quad O_2 = 11001 \end{array}$$

On voit bien l'échange qui s'est produit ici, le bit 5 ($k + 1$) a passé d'un individu à l'autre, pour ainsi former deux nouveaux individus (O_1 et O_2).

III.2.3.1.Mutation

Processus aléatoire ou un bit change de valeur.

Exemple : mutation du bit 2.

$$A_1 = 00101 \Rightarrow A_1' = 01101$$

Une explication plus complète de ces phénomènes ainsi qu'une preuve théorique de leur performance sont disponibles dans le livre de Goldberg [42].

III.2.4.Du codage binaire au codage réel

Les premières techniques d'utilisation de l'algorithme génétique utilisaient un codage binaire pour coder les individus. Mais le codage binaire entraîne certains problèmes, et le codage réel est plus précis [43].

Par exemple : Si on code à 5 bits, il n'est possible d'obtenir que $2^5 = 32$ différentes valeurs. Si on augmente le codage à 10 bits, il n'est possible d'avoir que 1024 différentes valeurs pour les paramètres.

III.2.4.1.Sélection

Le processus de sélection n'est pas modifié par le codage réel, puisque aucune opération algébrique n'est effectuée sur la séquence elle-même. Les meilleurs individus sont encore ceux qui ont la meilleure performance et sont ceux qui ont la meilleure chance de se reproduire.

III.2.4.2.Reproduction (croisement)

La technique principale de croisement en codage binaire est la coupure d'une séquence en deux parties, et l'échange de ces deux parties. Un rejeton reçoit la partie droite du parent 1 et la partie gauche du parent 2 ; le deuxième rejeton reçoit la partie gauche du parent 1 et la partie droite du parent 2. Comme on a vu dans la section précédente, le croisement se fait comme suit : soit deux parents $P_1 = 011|10010$ et $P_2 = 100|11110$ avec $k = 3$, on obtient les deux rejetons $O_1 = 01111110$ et $O_2 = 10010010$.

Exemple :

Deux séquences $\overline{P}_1 = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ et $\overline{P}_2 = (y_1, y_2, \dots, y_m)$ sont deux parents. Le point de croisement (choisi aléatoirement) se situe entre x_i et x_{i+1} . Les deux rejetons seront :

$$O_1 = (x_1, x_2, \dots, x_i, y_{i+1}, \dots, y_m)$$

$$O_2 = (y_1, \dots, y_i, x_{i+1}, \dots, x_m)$$

Chapitre III : Méthodes et modèles d'optimisation

Dans ce cas, le croisement binaire est le même que le croisement réel, puisqu'on n'a fait qu'échanger des paramètres.

III.2.3. Croisement entre bits

Si le point de croisement se situe entre les bits d'un paramètre, la partie du code binaire à gauche du point de croisement correspond aux bits les plus significatifs et la partie de droite aux bits moins significatifs.

Si le point de croisement est entre les bits k et $k + 1$, la perturbation équivaut à changer les bits $k + 1$ à n d'un des parents (pour une séquence codée à n bits). Si $S_i = b_i - a_i$ est l'intervalle du paramètre, la perturbation maximale est de $S_i 2^{-K}$. Afin de mieux illustrer ce point, on donne l'exemple suivant :

Soit $S_i = 0$ à 1 , codé à 5 bits. Deux parents, P_1 et P_2 sont

$$P_1 = 00101 \text{ OU } 5/32$$

$$P_2 = 11011 \text{ OU } 27/32$$

Si le point de croisement est entre les bits 3 et 4, les deux rejetons sont :

$$O_1 = 01111 \text{ ou } 7/32$$

$$O_2 = 11001 \text{ ou } 25/32$$

Les bits moins significatifs des parents sont 01 et 11 respectivement, et la différence entre eux est de $\pm 2/32$. On peut donc écrire que les rejetons sont

$$O_1 = P_1 + 2/32$$

$$O_2 = P_1 - 2/32$$

III.2.3.1. Mutation

Dans un codage binaire, lorsqu'il y a mutation, les bits sont changés de 0 à 1 ou de 1 à 0. Lorsqu'un bit subit une mutation, on peut le percevoir comme une perturbation du paramètre réel.

Exemple :

Soit $x_i = 10010$ un paramètre codé à 5 bits. L'intervalle de ce paramètre est de 0 à 32 ($S_i = 32$). Donc x_i représente le chiffre 18. Si le second bit est modifié, $x_i = 11010$, ou 26. La perturbation est positive, puisque le bit a changé de 0 à 1. L'amplitude du changement est $32 \cdot 2^{-2} = 8$, ce qui correspond à un changement de 18 à 26 (une augmentation de 8).

a) Le codage réel

Les deux seules opérations qui sont différentes des opérations binaires lorsqu'on code en réel sont la reproduction (croisement) et la mutation.

Chapitre III : Méthodes et modèles d'optimisation

III.2.4. Croisement entre paramètres

Si on commence avec une population finie, le croisement entre paramètres ne permet d'atteindre qu'un nombre fini de points dans l'espace de recherche, soit ceux où les paramètres sont choisis parmi les paramètres de la population.

Pour contourner ce problème, Wright propose une autre forme de croisement qu'il appelle le croisement linéaire: de deux parents P_1 et P_2 , trois rejetons sont générés de la façon suivante :

$$\begin{aligned}O_1 &= 0.5P_1 + 0.5P_2 \\O_2 &= 1.5P_1 - 0.5P_2 \\O_3 &= -0.5P_1 + 1.5P_2\end{aligned}$$

Les deux meilleurs rejetons sont choisis, ce qui conserve la taille de la population.

III.2.4.1. Mutation codée réelle

Pour concevoir un opérateur de mutation, il faut premièrement se demander si le point dans R_m (le vecteur des paramètres) doit subir un changement ou si chaque paramètre doit subir une mutation.

Il est plus difficile de faire correspondre une mutation en R_m au Théorème des Schémas, bien que celle-ci semble donner de meilleurs résultats (Schwefel, 1981 et Matyas, 1965). La mutation effectuée par Wright est faite sur chaque paramètre. Il y a alors deux problèmes :

- ✓ Il faut choisir l'amplitude des mutations.
- ✓ Le point muté doit demeurer dans l'espace de recherche.

Deux nouvelles valeurs sont alors définies :

- ✓ Une probabilité de mutation P_m
- ✓ Une amplitude maximale de changement.

Exemple :

Soit M , l'amplitude maximale du changement pour un paramètre x_i défini dans l'intervalle $a < x_i < b$.

- Si la mutation est positive, $x' = x_i + \text{nombre aléatoire dans } [0; \min(M; b - x_i)]$
- Si la mutation est négative, $x' = x_i - \text{nombre aléatoire dans } [0; \min(M; x_i - a)]$

III.2.5. Implantation de l'algorithme génétique

L'algorithme génétique de base fut expliqué dans les sections précédentes. Bien qu'il puisse être implanté tel qu'il fut présenté, l'algorithme utilisé dans ce travail diffère un peu et comporte certaines modifications.

Chapitre III : Méthodes et modèles d'optimisation

III.2.5.1. Population initiale

Lorsqu'on crée une population initiale, les valeurs des paramètres (les allèles des gènes) sont créées aléatoirement avec une distribution uniforme sur l'intervalle spécifié. Comme exemple, on considère une population composée de n individus.

Exemple :

On considère une population composée de n individus. On veut optimiser m variables (x_1, x_2, \dots, x_m) , donc chaque chromosome aura m gènes. Donc la population est :

$$\text{Pop} = \begin{cases} I_1 = (x_1^1, x_2^1, \dots, x_m^1) \\ I_2 = (x_1^2, x_2^2, \dots, x_m^2) \\ I_3 = (x_1^3, x_2^3, \dots, x_m^3) \\ \vdots \\ I_n = (x_1^n, x_2^n, \dots, x_m^n) \end{cases}$$

Chaque individu I_i est composé d'un chromosome à m gènes dont les valeurs sont choisies aléatoirement. Normalement, chaque paramètre d'un individu a sa valeur propre (puisqu'on crée les individus de façon aléatoire), c'est-à-dire,

$$x_i^1 \neq x_i^2 \neq \dots \neq x_i^n \text{ ou } i = [1, 2, \dots, m]$$

III.2.5.2. Reproduction

Après avoir sélectionné les individus qui vont traverser pour former la progéniture. Chaque paire d'individus est choisie au hasard dans le groupe de sélection. La probabilité de choix individuel est proportionnelle à ses relations personnelles.

Après avoir pris une paire d'individus (P_1 et P_2) ils vérifient la présence d'un croisement, le livre de la possibilité de croiser l'ordinateur (qui affecte généralement entre 0.85 et 1)

$$O_1 = 0.5P_1 + 0.5P_2$$

$$O_2 = 0.5P_1 - 0.5P_2$$

$$O_3 = -0.5P_1 + 1.5P_2$$

Les deux meilleurs individus sont conservés afin de garder la taille de la population constante.

Le croisement est appliqué à chaque paramètre. Soit deux parents P_1 et P_2 constitués de m variables indépendantes,

Chapitre III : Méthodes et modèles d'optimisation

$$P_1 = \begin{pmatrix} x_1^1 \\ x_2^1 \\ \vdots \\ x_m^1 \end{pmatrix}, P_2 = \begin{pmatrix} x_1^2 \\ x_2^2 \\ \vdots \\ x_m^2 \end{pmatrix}$$

Puisque $O_1 = 0.5P_1 + 0.5P_2$:

$$O_1 = 0.5 \begin{pmatrix} x_1^1 \\ x_2^1 \\ \cdot \\ \cdot \\ x_m^1 \end{pmatrix} + 0.5 \begin{pmatrix} x_1^2 \\ x_2^2 \\ \cdot \\ \cdot \\ x_m^2 \end{pmatrix}$$

Les rejetons sont :

$$O_1 = \begin{pmatrix} 0.5x_1^1 + 0.5x_1^2 \\ 0.5x_2^1 + 0.5x_2^2 \\ \cdot \\ \cdot \\ 0.5x_m^1 + 0.5x_m^2 \end{pmatrix}$$

Le processus est le même que la création de deux autres personnes. Une fois que la progéniture est créée, vous récupérez un certain nombre d'individus qui, en théorie, ont une meilleure performance moyenne que les individus de la génération précédente.

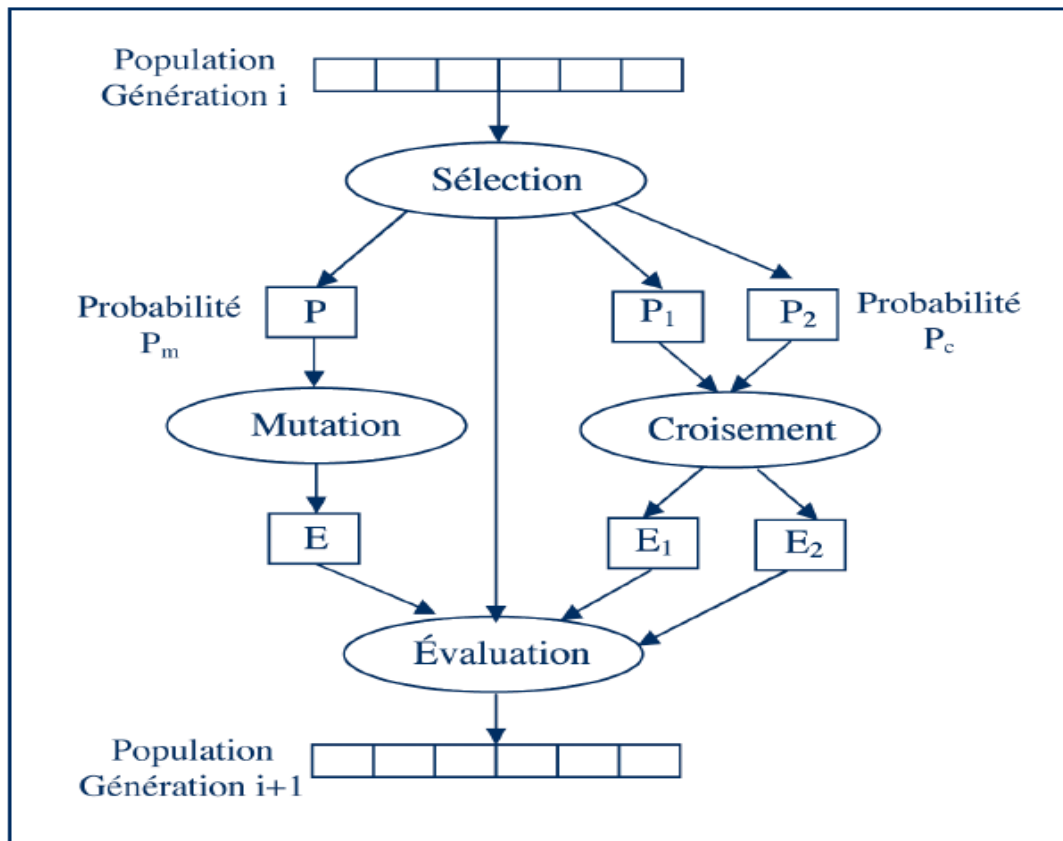


Figure III.1 Principe général d'un algorithme génétique [41].

III.3. Les modèles d'optimisation

Le procédé de soudage est très complexe, en effet, il inclut plusieurs phénomènes tels que le transfert et diffusion de la chaleur, l'usure, déformation et écoulement de la matière, fusion et changement d'état, vibrations et réaction chimique...etc. La modélisation analytique de ce procédé est très fastidieuse et le plus souvent trop simplifiée par des hypothèses. En conséquence, la plupart des chercheurs optent pour la modélisation empirique, qui exploite la méthodologie des plans d'expériences, pour la compréhension de tels procédés. Les modèles d'optimisation qui seront présentés par la suite sont des modèles empiriques issus de campagne d'expériences.

➤ Résistance à la traction R_t (MPa)

Les propriétés mécaniques R_t , de joint soudé par friction-malaxage en fonction de la vitesse de rotation de l'outil (N), de la vitesse d'avance (V_a), décalage d'outil (S) et de l'angle

Chapitre III : Méthodes et modèles d'optimisation

d'inclinaison (α). Le modèle de surface de réponse pour la résistance à la traction, représenté par cette équation MehranTamjidy, et.al [39].

$$Rt = 251.667 - 6.302N + 6.33V_a - 2.318\alpha - 3.208S - 5.271N^2 - 4.771V_a^2 - 5.347\alpha^2 - 6.558S^2 \quad (3.11)$$

Les résultats statistiques des modèles de régression mathématique à été calculés. Lorsque la valeur de R^2 est égale à un, la valeur prédite de réponse 94,62%, ce qui indique que le modèle développé est tout à fait adéquat [39].

Une autre étude selon Mohamed Ackiel Mohamed, et. Al [38], indique que, les propriétés mécaniques Rt , de joint soudé par friction-malaxage en fonction de la vitesse de rotation de l'outil (N), de la vitesse d'avance (V_a),

$$Rt = 162.22 + 0.036N + 12.297V_a - 0.0055NV_a \quad (3.12)$$

Les résultats statistiques des modèles de régression mathématique à été calculés. Lorsque la valeur de R^2 est égale à un, la valeur prédite de réponse 87,6%, ce qui indique que le modèle développé est tout à fait adéquat [38].

Et selon Raja kumar, et, al [40], indique que Rt dépend de la vitesse de rotation (N), de la vitesse d'avance (V_a), de la force axiale (F), diamètre de l'épaule (D), diamètre du pion (d) et dureté de l'outil (H) et il peut être exprimé comme suit :

$$Rt = 223.18 + 4.77N + 2.6V_a + 2.77F + 2.64D + 2.1d + 0.85h + 1.16ND + 0.97Nd - 1.22Nh + 0.97V_aF + 1.09V_a h - 3.78FD - 3.22Fd - 1.66Fh - 1.28Dh - 1.09dh - 4.74N^2 - 5.8V_a^2 - 5.19F^2 - 5.8D^2 - 5.45d^2 - 6.25h^2 \quad (3.13)$$

Tel que la valeur prédite de réponse 95% [40]

➤ L'allongement A(%)

Les propriétés mécaniques $A = (N, V_a, \alpha, S)$

$$A = 7.36667 - 0.6375N - 0.54583V_a - 0.55417S - 0.22396\alpha^2 - 0.25625NS + 0.39375V_aS \quad (3.14)$$

Chapitre III : Méthodes et modèles d'optimisation

Le coefficient de détermination ajusté R^2_{adj} , qui renseigne sur la fidélité du modèle est de 93.82%, le modèle développé explique 93.82 % des résultats et données d'expérimentation Mehran Tamjidy, et al [39].

➤ La dureté minimale D_m (HV)

La durée de vie de l'outil, tel que $D_m = (N, V_a, \alpha, S)$, est donnée par [39]:

$$D_m = 70.0833 - 2.5875N + 2.6875V_a - 1.2292S - 2.3615N^2 - 2.024V_a^2 - 3.0615\alpha^2 - 3.2365S^2 - 0.8812NV_a + 0.8562NS - 0.8687V_aS \quad (3.15)$$

Le coefficient de fidélité est égal à 96.63%, ce qui indique que le modèle développé est tout à fait adéquat [39].

➤ Classe de qualité de la soudure Q

Les propriétés mécaniques de qualité de la soudure sont exprimées en fonction de vitesse de rotation (N) et vitesse d'avance (V_a), d'après Mohamed Ackiel Mohamed, et al [38].

$$Q = 4.7 - 0.00225N - 1.7611V_a + 0.00206NV_a \quad (3.16)$$

Une plus grande valeur de R^2_{adj} et une plus petite valeur d'erreur, donc cela détermine la pertinence d'un modèle de régression. Les valeurs calculées des modèles développés par rapport aux valeurs mesurées impliquent une erreur de l'analyse de régression de 0.05328, tandis que les valeurs R^2_{adj} obtenues sont raisonnablement élevées pour une meilleure qualité de soudure 82.5%

➤ Dureté des pièces soudées D_s (HV)

La Dureté des pièces soudées D_s dépend de la vitesse de rotation (N), de la vitesse d'avance (V_a), de la force axiale (F), diamètre de l'épaulement (D), diamètre du pion (d) et dureté de l'outil (H) et il peut être exprimé comme suit, [40].

$$D_s = 121.11 + 7.9N + 1.55V_a + 2.07F + 2.51D + 3.47d + 1.55H + 0.37NV_a + 0.81NF + 1.19ND + 1.81Nd + 0.56V_aH - 0.44Fd + 0.62FH - 7.85N^2 - 7.4V_a^2 - 7.05F^2 - 6.96D^2 - 5.9d^2 - 7.58H^2 \quad (3.17)$$

Tous les coefficients des facteurs significatifs sont calculés à un niveau de confiance de 95%

Chapitre III : Méthodes et modèles d'optimisation

➤ Taux de corrosion T_c (mm .an⁻¹)

Taux de corrosion T_c est en fonction de la vitesse de rotation (N), de la vitesse d'avance (V_a), de la force axiale (F), diamètre de l'épaule (D), diamètre de la goupille (d) et dureté de l'outil (H) et il peut être exprimé comme tel [40].

$$T_c = 1.76 - 0.68N - 0.09V_a + 0.06F - 0.46D - 0.12d - 0.09H + 0.09NV_a + 0.08NF + 0.17V_aD + 0.2V_ad + 0.15FD - 0.07Fd - 0.29Dd + 0.13DH - 0.1dH + 0.88N^2 + 0.56V_a^2 + 0.52F^2 + 0.64D^2 + 0.43d^2 + 0.53H^2 \quad (3.18)$$

➤ Dureté de la zone de pépite D_p (HV)

Les propriétés mécaniques de la zone de pépite soudures sont exprimées en fonction de vitesse de rotation(N) et vitesse d'avance (V_a), d'après Mohamed Ackiel Mohamed, et. al [38].

$$D_p = 73.57 - 0.0041N - 12.65V_a + 0.015NV_a \quad (3.19)$$

Une plus grande valeur de R^2_{adj} et une plus petite valeur d'erreur, donc cela détermine la pertinence d'un modèle de régression. Les valeurs calculées des modèles développés par rapport aux valeurs mesurées impliquent une erreur de l'analyse de régression de 0.3049, tandis que les valeurs R^2_{adj} obtenues sont raisonnablement élevées pour une meilleure qualité de soudure 90%

Conclusion

Dans ce chapitre, après avoir présenté une revue de littérature sur le cheminement et le développement des méthodes d'optimisation en général, nous avons exposés les plus usitées d'entre elles et nous pouvons conclure que les méthodes bio et socio-inspirées sont les plus efficaces et fiables pour la résolution de tout type de problèmes d'optimisation. Nous avons également présenté les modèles mathématiques, les plus fideles possibles, des performances inhérentes au procédé de soudage par friction, qui nous serviront par la suite dans le chapitre 4 pour formuler les différents problèmes d'optimisation.



CHAPITRE IV :
ETUDE DE CAS

Introduction

Dans ce chapitre nous traiterons deux problèmes d'optimisation bi-objectifs avec contrainte et tri-objectifs sans contrainte. Pour cela, nous aurons à utiliser trois modèles en relation avec la résistance à la traction, la dureté et la qualité du joint de soudure. Le premier cas, nous visons à déterminer les conditions opératoires optimales de soudage conduisant au maximum de qualité et de résistance tout en respectant une dureté maximale tolérée du joint. Dans le second, nous chercherons à obtenir les valeurs paramétriques, satisfaisant simultanément les trois performances citées en haut sans contrainte pratique. La résolution des deux problèmes posés sera faite à l'aide de l'algorithme génétique NSGA-II. Notre choix s'est porté sur cette technique d'optimisation, du fait de sa rapidité dans la convergence vers l'optimum global, notamment de sa facilité de mise en œuvre avec des paramètres de réglage de l'algorithme standard (population initiale, nombre de générations, probabilité de croisement et de mutation...) et également de sa précision. Cet algorithme a la particularité de traiter les problèmes multi-objectifs efficacement et offre une représentation pratique et très utile des solutions du problème avec le tri non dominé de ses dernière en se basant sur le principe de Pareto.

IV.1. Cas d'optimisation deux-objectifs avec contraintes

IV.1.1. Modèles d'optimisation retenus

- **résistance a la traction R_t** : on souhaite avoir une résistance maximale possible (équation 3.12).
- **Classe de qualité de la soudure Q** : nous voulons une classe de qualité maximale (équation 3.16).

Contrainte

- **Dureté de la zone de pépite D_p (HV)**

Les pièces soudées sont soumises a un cycle thermique d'échauffement rapide et d'un refroidissement plus ou moins long. La dureté de la pépite soudée augmente ainsi après le

Chapitre IV : Etude de cas

soudage, ce qui la rend fragile. On désire donc ne pas dépasser une valeur limite maximale Dp_{max} (équation 3.19).

IV.1.2. Formulation du problème

Pour analyser la sensibilité de solution, nous avons proposé d'examiner un cas d'optimisation de deux-objectifs (Rt , Q) avec une contrainte (Dp), en FSW des deux plaques d'aluminium (AA6061-T6), la formulation du problème d'optimisation s'écrit comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \max Rt \\ \max Q \\ \text{tel que} \\ Dp \leq Dp_{max} \\ V_{\alpha min} \leq V_{\alpha} \leq V_{\alpha max} \\ N_{min} \leq N \leq N_{max} \end{array} \right.$$

IV.1.3. Données numérique

Les constantes et les données numériques d'optimisation, utilisées dans la formulation du problème de notre cas d'étude, sont données dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV.1 Valeurs des coefficients et constantes utilisées.

$Dp_{max} = 65 \text{ HV}$	$N_{min} = 650 \text{ tr/min}$	$N_{max} = 1400 \text{ tr/min}$
$V_{\alpha min} = 0.78 \text{ mm/s}$	$V_{\alpha max} = 4.55 \text{ mm/s}$	

IV.1.4.Résultats et discussions

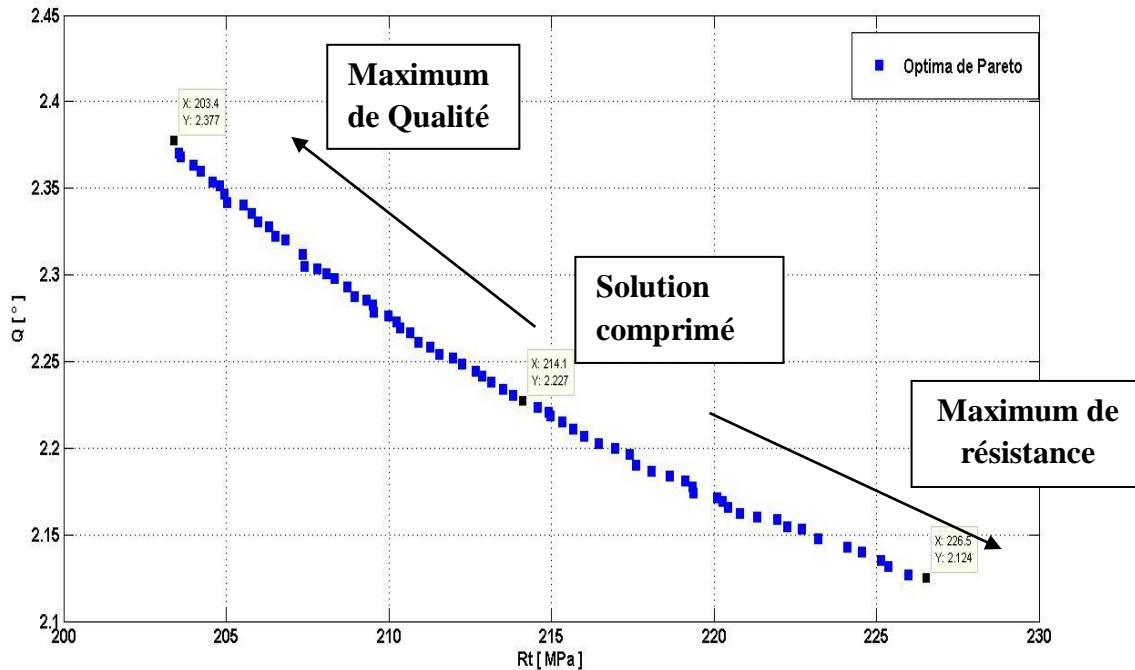


Figure IV.1 Front de Pareto des solutions non dominées.

Les solutions au problème bi-objectif avec contrainte sur la dureté de joint de soudure sont présentes sous forme de Front de Pareto (figure IV.1).

Dans le tableau ci-contre, nous avons pris trois solutions sur l'ensemble des solutions présentées dans le front de Pareto ci-dessus.

Pour les trois solutions la qualité varie légèrement contrairement à la résistance. La meilleure résistance est obtenue avec une vitesse d'avance de l'outil maximale et une fréquence de rotation modérée. Pour une meilleure qualité les vitesses d'avance doit être de l'ordre 2 mm/s. la solution qui réalise un compromis entre qualité et résistance à 50% chacun est obtenue pour $V_a = 3.11$ mm/s et $N = 722.65$ tr/min.

D'autres solutions qui favorisent les deux objectifs fixés à différents pourcentages sont présentés sur le front de Pareto, qui est un outil d'aide à la décision dans le choix des conditions optimales du soudage par friction.

Chapitre IV : Etude de cas

Tableau IV.2 Les solutions et paramètres optimaux.

Les cas	Variable de décision	Objectif Q [A°]	Objectif Rt [MPa]
Premier point	N= 650 tr/min	2.377	203.4
	Va= 2.038 mm/s		
Deuxième point	N= 722.65 tr/min	2.227	214.1
	Va=3.11 mm/s		
Troisième point	N= 763 tr/min	2.124	226.5
	Va= 4.55 mm/s		

Vert : (100% Favorable),
 orange : (50% Favorable),
 bleu : (100% Défavorable)

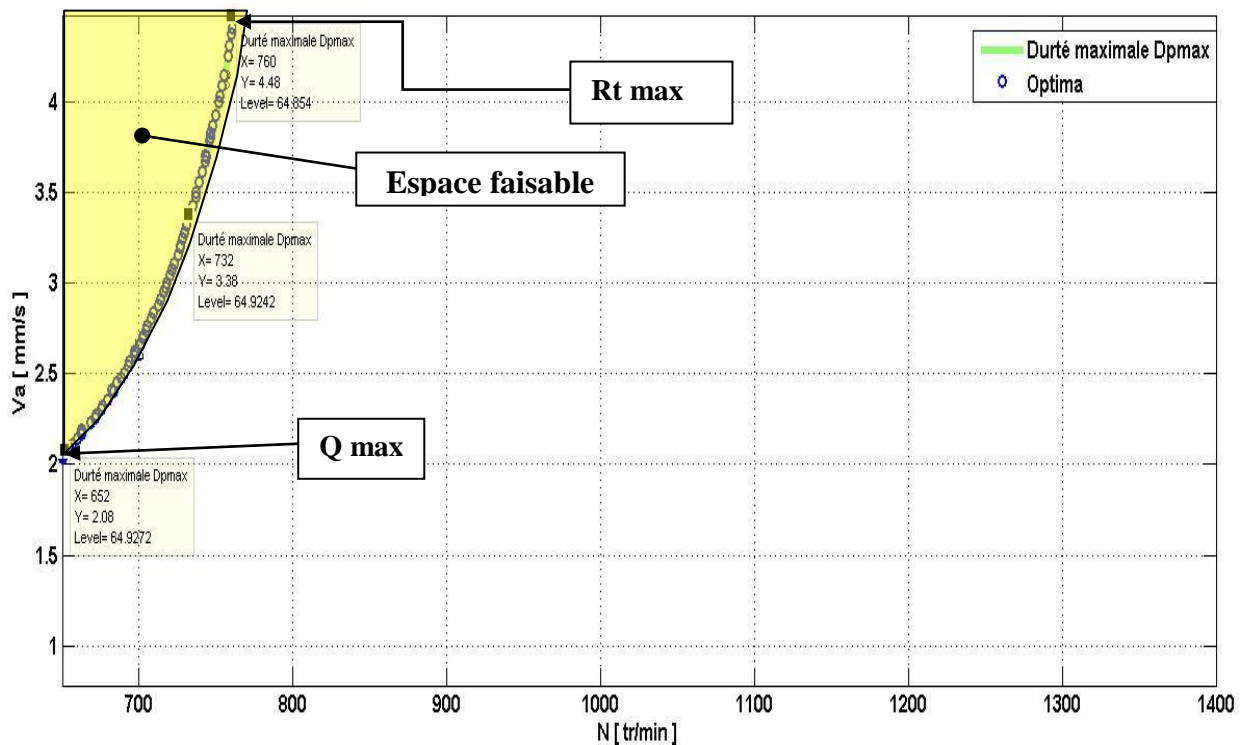


Figure IV.2 Les solutions non dominées du front de Pareto dans l'espace de recherche faisable.

Les solutions obtenues par l'algorithme NSGA-II sont satisfaisantes puisque les optima sont à l'entreeur du domaine faisable par conséquent la contrainte liés a la dureté maximale du joint de soudure est respectée.

IV.2. Cas d'optimisation multi-objectifs sans contraintes

IV.2.1. Modèles d'optimisation retenus

- **résistance a la traction R_t** : on souhaite avoir une résistance maximale possible (équation 3.12).
- **Classe de qualité de la soudure Q** : nous voulons une classe de qualité maximale (équation 3.16).
- **La Dureté de la zone de pépite soude D_p** : on souhaite avoir une dureté de pépite minimale possible (équation 3.19).

IV.2.2. Formulation du problème

Pour analyser la sensibilité de solution, nous avons proposé d'examiner un cas d'optimisation multi-objectifs (R_t , Q , D_p) sans contraintes, en FSW des deux plaques d'aluminium (AA6061-T6), la formulation du problème d'optimisation s'écrit comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \max R_t \\ \max Q \\ \min D_p \\ \\ \text{tel que} \\ V_{\alpha \min} \leq V_{\alpha} \leq V_{\alpha \max} \\ N_{\min} \leq N \leq N_{\max} \end{array} \right.$$

IV.2.3. Données numérique

Les constantes et les données numériques d'optimisation, utilisées dans la formulation du problème de notre cas d'étude, sont données dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV.3 Valeurs des coefficients et constantes utilisées.

$V_{\alpha \min} = 0.78 \text{ mm/s}$	$V_{\alpha \max} = 4.55 \text{ mm/s}$
$N_{\min} = 650 \text{ tr/min}$	$N_{\max} = 1400 \text{ tr/min}$

IV.2.4. Résultats et discussions

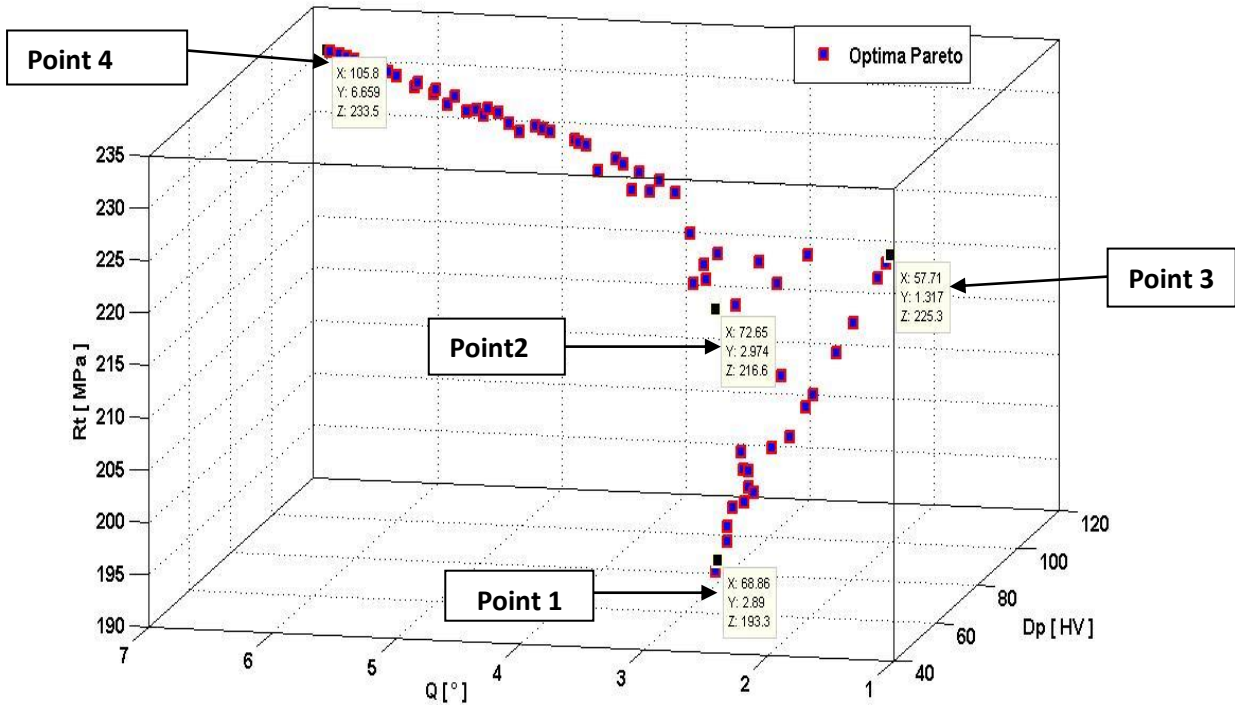


Figure IV.3 Les solutions non dominées du front de Pareto.

Les solutions non dominée du front de Pareto du problème tri-objectif posé, sont présentées sur la figure ci-dessus. Nous avons choisi quatre solutions de ce front qui favorise chacun des objectifs.

Tableau IV.4 Les solutions et paramètres optimaux

Les solutions	Les variables	Dp [HV]	Q [A°]	Rt [MPa]
Premier point	N= 678.27tr/min	68.86	2.89	193.3
	Va = 0.78 mm/s			
Deuxième point	N= 905.88tr/min	72.65	2.974	216.6
	Va= 2.975			
Troisième point	N=650 tr/min	57.71	1.317	225.3
	Va= 4.55 mm/s			
Quatrième point	N= 1400tr/min	105.8	6.659	233.5
	Va=4.55 mm/s			

Vert : (100% Favorable), **orange** : (50% Favorable), **bleu** : (100% Défavorable)

Chapitre IV : Etude de cas

Le premier point réalise un compromis entre dureté et qualité du joint de soudure, mais conduit à une résistance mécanique médiocre du joint.

Le deuxième point quant à lui réalise un bon compromis entre tous les objectifs. Le troisième point favorise à 100 % la dureté du joint et défavorise à 100% la qualité du la pièce soudé avec une résistance moyenne et acceptable 225.3 MPa.

Enfin, le quatrième point satisfait au plus haut point la résistance mécanique et la qualité de la soudure au détriment de la dureté du joint de la soudure qui est a sont maximum 105.8 HV.

Par conséquent, pour minimiser la dureté on doit utiliser de faible vitesse de rotation et une vitesse d'avance élevée. Afin de maximiser la qualité et la résistance mécanique on doit combiner des vitesses élevées d'avance et de rotation. Des valeurs moyenne de ces deux paramètres doivent être utilisé dans une gamme [$N=905.88\text{tr/min}$, $V_a= 2.975 \text{ mm/s}$].

D'après les résultats de ce tableau on remarque que :

- Pour le 1^{ème} point N_{\min} et $V_{a_{\min}}$ on remarque que notre objectifs Dp est un peu mois Q sont favorable mais on a défavorisé Rt.
- pour le 2^{ème} point N_{moyenne} et $V_{a_{\text{moyenne}}}$ on remarque que notre objectifs Dp et Q et Rt sont satisfaisants.
- pour le 3^{ème} point N_{\min} et $V_{a_{\max}}$ on remarque que notre objectifs Rt et Dp sont favorable mais on a défavorisé Q.
- pour le 4^{ème} point N_{\max} et $V_{a_{\max}}$ on remarque que notre objectifs Rt et Q sont favorable mais on a défavorisé Dp.

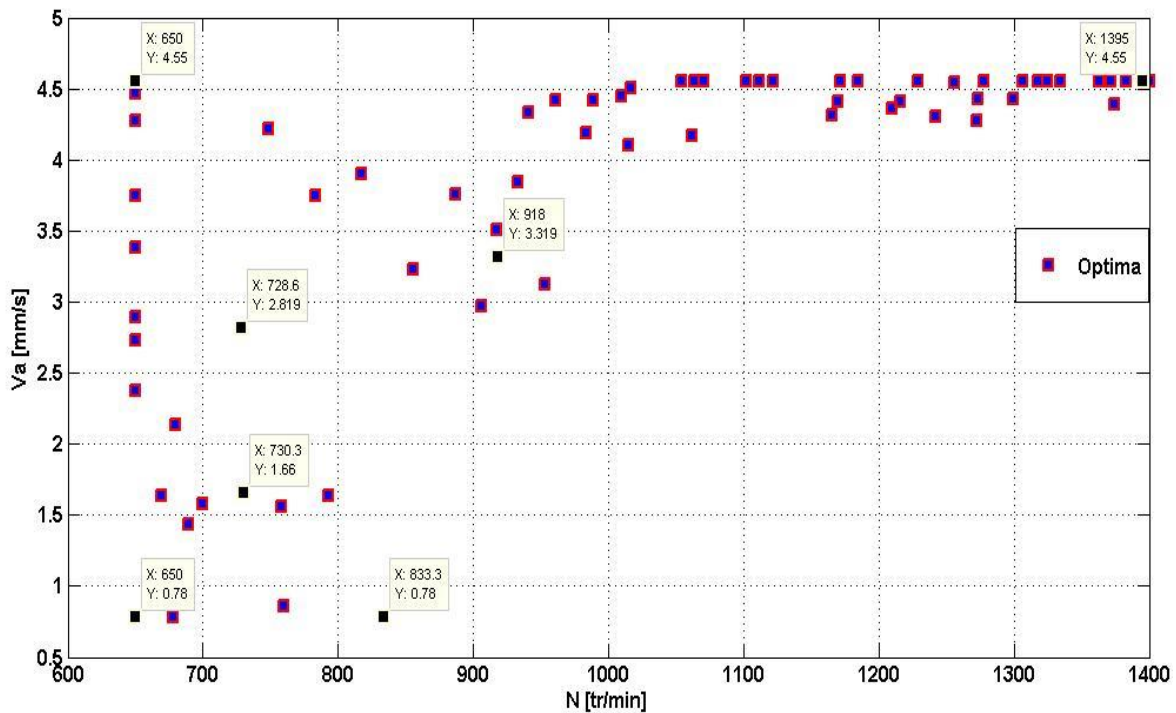


Figure IV.4 Les solutions non dominées du front de Pareto

On remarque que :

- Ya plusieurs solutions entre l'intervalle $[N_{\min} \text{ et } [V_{a\min} , V_{a\max}]]$.
- Ya plusieurs solutions entre l'intervalle $[V_{a\max} \text{ et } [N_{\min} , N_{\max}]]$.

Donc pour plus de solution :

Soit on fixe $N=N_{\min}$ et $V_a=V_{a\min} \leq V_a \leq V_{a\max}$

Soit on fixe $V_a= V_{a\max}$ et $N=N_{\min} \leq N \leq N_{\max}$

Conclusion

Les points principaux qu'on peut tirer des résultats obtenus sont :

La vitesse d'avance (V_a) influence sur la résistance à la traction (R_t) de telle façon que pour favoriser à 100 % notre objectif ($R_{t\max}$), il faudrait une vitesse d'avance maximale. Ensuite, Pour favorisé la dureté ($D_{p\min}$) à 100 %, une vitesse de rotation minimale est recommandée, par contre, pour favorisé seulement la qualité (Q_{\max}), il est préconisé d'opter des vitesses de rotation et d'avance maximales possibles.

*Conclusion
générale*

Conclusion générale

Conclusion générale

Le procédé de soudage par friction malaxage s'avère bénéfique pour le soudage d'alliages d'aluminium et il est exposé à un avenir très prometteur dans divers domaines d'application. Cependant, bien que cette technique existe depuis plus d'une vingtaine d'années, plusieurs phénomènes sont encore incompris et l'amélioration des outils de soudage ainsi que des paramètres d'utilisation est encore requise. D'ailleurs, la plupart des études visant à améliorer le procédé de soudage sont encore faites de façon expérimentale.

Le travail présenté dans ce manuscrit a porté sur la mise en place d'une modélisation et optimisation multi-objectif des paramètres de soudage par friction. 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 : détermination des conditions de soudage optimales réduisant la dureté et maximisant la qualité et la résistance du joint de soudure. Dans cette étude nous avons proposé, pour une opération de soudage en position par FSW d'un alliage d'aluminium (AA6061 T6), une technique d'optimisation à recherche aléatoire a été utilisée pour afin de sélectionner les conditions de soudage optimales (vitesse d'avance, vitesse de rotation et l'effort appliquée sur l'outil).

Ce travail se veut une optimisation multi-objectifs par l'algorithme génétique NSGA-II des conditions de soudage par friction, intégrant des réponses multiples entre autre ; la résistance à la traction, le profil de dureté et la classe de qualité de la soudure. Deux problèmes d'optimisation ont été posés, le premier a été formulé autour de l'optimisation simultanée de la qualité et de la résistance sous une restriction de la dureté maximale, l'autre, vise l'optimisation sans contrainte des trois performances citées. L'étude a mis en exergue les constatations suivantes :

Dans le premier cas, les solutions obtenues par l'algorithme NSGA-II sont satisfaisantes puisque les optima sont à l'entreeur du domaine faisable. De plus, la meilleure solution qui réalise un compromis entre la qualité et la résistance et dureté de la pièce à 50% chacun, a pu être déterminée facilement sur le front de Pareto. Par conséquent, les valeurs des paramètres de soudage recommandées sont (3.11 mm/s) et (722.65 tr/min).

Dans notre deuxième cas, les solutions préconisées par l'algorithme NSGA-II pour satisfaire les trois objectifs, doivent être fixées à 2.975 mm/s, et 905.88tr/min. La contribution de chacune des variables de décision sur la résistance a la traction est de (71,8%) pour la vitesse de d'avance et (28,2%) pour la vitesse de rotation influencer. La vitesse d'avance joue un rôle majeur dans la l'obtention de la résistance mécaniques à la traction dans les joints FSW.

Conclusion générale

L'influence de la vitesse de rotation sur la réduction de la dureté de la pépite est majeure avec une contribution (99%). Quant au pourcentage de contribution dans la maximisation de la qualité des deux paramètres est de (50%) chacun. Le meilleur compromis entre tous les objectifs fixés est réalisé avec des valeurs paramétriques optimale de (2.97 mm / s) et (905 tr / min).

Dans les perspectives à venir, nous recommandons l'optimisation du procédé de soudage par friction avec la prise en compte d'autres performances soudage en relation avec L'allongement A(%), La dureté minimale D_m (HV), Dureté des pièces soudées D_s (HV), Pour une meilleure compréhension et maîtrise du procédé du soudage par friction.

*Références
bibliographiques*

Bibliographie

- [1] **Luc Fairon** : "*Introduction au soudage*" (Ingénieur souder ESSA EWER FR 0466)2006
- [2] **MEKA–H- 201** : *Chapitre assemblage et soudage*. Thèse de doctorat de l'Ecole Polytechnique, Mécanique, Matériaux, 2006
- [3] **Benddeb Mostapha** : "*Etude les défauts de soudage des pipelines*". Mémoire de Master, Université de Biskra .2012
- [4] **Gerlich A., Su P., North T.H.**: "*Tool penetration during friction stir spot welding of Al and Mg alloys* " *Journal of Materials Science*, volume 40, pages 6473-6481, 2005
- [5] **Johnson R.**: "*Forces in friction stir welding of aluminium alloy*", International FSW Symposium, Japan, 2001
- [6] **Kumar K., Kailas S.V.**: "*The role of friction stir welding tool on material flow and weld formation*", *Materials Science and Engineering A*, volume 485, pages 367-374, 2008
- [7] **Mishra R.S., Ma Z.Y.**: "*Friction stir welding and processing*", *Materials Science and Engineering R*, volume 50, pages 1-78, 2005
- [8] **Thomas W. M., Nicholas E. D., Smith S.D., Das S.K., Kaufman J.G.,Lienert T.J.**: "*Aluminum 2001-Proceedings of the TMS 2001 Aluminum Au tomotive and Joining Sessions*", TMS, page 213, 2001
- [9] **Zhang Z., Zhang H.W.**: "*3D Numerical studies on effect of axial pressure in Friction Stir Welding*", *Science and Technology of Welding and Joining*, volume 12, pages 226-248, 2007
- [10] **Bastier A** : "*Modélisation du soudage d'alliages d'Aluminium par friction et malaxage*", Thèse de doctorat de l'Ecole Polytechnique, Mécanique, Matériaux, 2006
- [11] **MARTINAND, J.L** : "*et al Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences*". Paris : INRP(1994)
- [12] **VERGNAUD, G** : " *Les fonctions de la symbolisation dans la formation des connaissances de l'enfant. In J. Piaget, P. Mounard & J.P. Bronckart (Eds), Psychologie*". Encyclopédie de la Pléiade (pp 821-844). Paris : Gallimard(1987)
- [13] **WALLISER, B** : "*Systèmes et modèles*". Paris : le Seuil (1977)
- [14] **LIU, G.R. and M.B. LIU**: "*Smoothed Particle Hydrodynamics*": A Meshfree Particle Method, Singapore: World Scientific Publishing. 449.2003

- [15] **C. Vidal and V:** " *In fante, Optimization of FS welding parameters for improving mechanical behavior of AA2024- T351 joints based on Taguchi method*", Journal of Materials Engineering and Performance, 2261-2270.22-2013
- [16] **K. Kumar, S. V. Kailas:** " *On the role of axial load and the effect of interface position on the tensile strength of a friction stir welded aluminum alloy*", Materials and Design, 29 (4) pp. 791 -797, 2007
- [17] **Ş. Kasman:** " *Multi-response optimization using the taguchi based grey relational analysis*": a case study for dissimilar friction stir butt welding of AA6082-T6/AA5754- H111, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 68 (1-4) 795-804.2013
- [18] **N. Muhammad, Y. H. P. Manurung, R. Jaafar, S. K. Abas, G. Tham and E. Haruman:** " *Model development for quality features of resistance spot welding using multi-objective Taguchi method and response surface methodology*", Journal of Intelligent Manufacturing, 1175-1183. 24 -6 -2012
- [19] **Hamilton, C, S. Dymek, and A. Sommers:** " *A thermal model of friction stir welding in aluminum alloys*". International Journal of Machine Tools and Manufacture, 48(10): p.1120-1130.2008
- [20] **B. K. Bhuyan and V. Yadava:** " *Experimental modeling and multi-objective optimization of traveling wire electrochemical spark machining (TW-ECSM) process*", Journal of Mechanical Science and Technology, 2467-2476, 27 8 2013
- [21] **Elangovan, K., Balasubramanian, V., and Babu, S:** " *Predicting tensile strength of friction stir welded AA6061 aluminium alloy joints by a mathematical model*". Mater. Des, 188–193, 2009
- [22] **S. Kumar, Meenu and P. S. Satsangi:** " *Multiple-response optimization of turning machining by the taguchi method and the utility concept using unidirectional glass fiber reinforced plastic composite and carbide (k10) cutting tool*", Journal of Mechanical Science and Technology, 2829-2837, 27 9 2013
- [23] **J. Antony:** " *Simultaneous optimization of multiple quality characteristics in manufacturing processes using Taguchi's Quality Loss Function, Int*". Journal Adv. Manufacturing Technology, 134-138.17 2001

- [24] **Kim Y.G., H. Fujii, T. Tsumura, T. Komazaki, K. Nakata:** "*Three defect types in friction stir welding of aluminum die casting alloy*", *Materials Science and Engineering A*, 415 (1-2) pp. 250-254, 2006
- [25] **K. Elangovan, V. Balasubramanian:** "*Influences of pin profile and rotational speed of the tool on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminum alloy*" *Materials Science and Engineering A*, 459, pp. 7-18, 2007
- [26] **K. Kumar, S. V. Kailas:** "*On the role of axial load and the effect of interface position on the tensile strength of a friction stir welded aluminum alloy*", *Materials and Design*, 29 (4) pp. 791-797, 2007
- [27] **A. Scialpi, L.A.C. De Filippis, P. Cavaliere:** "*Influence of shoulder geometry on microstructure and mechanical properties of friction stir welded 6082 aluminum alloy*". *Materials and Design*, 28, pp. 1124–1129, 2007
- [29] **C. Genevois :**"*Genèse des microstructures lors du soudage par friction malaxage d'alliages d'aluminium de la série 2000 et 5000 et comportement mécanique résultant*". PhD thesis, INPG, 2004
- [30] **ATHARIFAR, H., D.C. LIN, and R. KOVACEVIC:** "*Numerical and Experimental Investigations on the Loads Carried by the Tool During Friction Stir Welding*". *Journal of Materials Engineering and Performance*: p. 339-350. 18 4 2009
- [31] **JOHNSON, G.R. and W.H. COOK, A:**" *constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high*". *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics*: p. 541–547. 1983
- [32] **ATHARIFAR, H., D.C. LIN, and R. KOVACEVIC:** "*Numerical and Experimental Investigations on the Loads Carried by the Tool During Friction Stir Welding*". *Journal of Materials Engineering and Performance*: p. 339-350. 18.04.2009
- [33] **ZHANG, H.W., Z. ZHANG, and J.T. CHEN:** "*3D modeling of material flow in friction stir welding under different process parameters*" *Journal of Materials Processing Technology*. 183(1): p. 62-70. 2007
- [34] **Venkates warlu, D.; Mahapatra, M.; Harsha, S.; Mandal, N:** "*Processing and optimization of dissimilar friction stir welding of AA 2219 and AA 7039 alloys*". *J. Mater. Eng. Perform*, 4809–4824. 2015

- [35] **Record, J.H. et al Covington, Fundamental:** *characterization of Friction Stir Welding*". Proceed in gs of the fth international symposium on Friction Stir Welding, Metz B.W.2004
- [36] **Zhao, et al Y.H., Lin:**"*The influence of pin geometry on bonding and mechanical properties in friction stir weld al alloy*". Materials Letters, 59, 2948 2952, 2005
- [37] **Arora, A., et al., Torque:** "*power requirement and stir zone geometry in friction stirwelding through modeling and experiments*". Scripta Materiali,13. 16. 2009
- [38] **Mohamed Ackiel Mohamed, et al Mohamed Nor Berhan:** "*University Kuala Lumpur Malaysia France Institute, Bandar BaruBangi, Selangor, Malaysia 2Faculty of Mechanical Engineering*", Universiti Teknologi MARA (UiTM), 40450, Shah Alam, Selangor, Malaysia Manuscript Received August 4, 2014; Revised January 12, 2015; Accepted February 6, 2015
- [39] **MehranTamjidy, et al. Hang Tuah Baharudin:**"*Department of Mechanical and Manufacturing Engineering*", University Putra Malaysia, 43400 Serdang, Selangor, Malaysia; mehrantamjidy@gmail.com (M.T.); shamsuddin@upm.edu.my (S.S.)11 May 2017; Published: 15 May 2017
- [40] **S. Rajakumar, et, al C. Muralidharan:**"*Center for materials joining and research (CEMAJOR), department of manufacturing engineering*". Annamalai university Annamalairagar 608 002, Chidambaran tamilna du, india, 17 .12. 2010
- [41] **Holland:** "*Adaptation in Natural and Artificial Systems*". University of Michigan Press Ann Arbor, 1975
- [42] **Goldberg, D.E:** "*Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*".Addison Wesley, Reading, MA, 1989
- [43] **A. Wright:** "*Genetic Algorithms for Real Parameter Optimization*", pp. 205–218 Morgan Kaufmann, San Mateo, CA, 1991
- [44] **Madani Mohammed Saïd Et Ghouini Rabah :** "*Amélioration des paramètres technologiques de coupe en tournage*" mémoire de fin d'étude, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2011
- [45]. **Mishra, R.S.; Mahoney:** "*M.W. Friction Stir Welding and Processing*"; ASM International: Almere, The Netherlands, 2007

[46]. Cole, E.; Fehrenbacher, A.; Duffie, N.; Zinn, M.; Pfefferkorn, F.; Ferrier, N. *Weld"temperature effects during friction stir welding of dissimilar aluminum alloys 6061-t6 and 7075-t6. Int. J. Adv". Manuf. Technology*, 71, 643–652. 2014

[47]. Muruganandam, D.; Das, S.L.:"*Friction Stir Welding Process Parameters for Joining Dissimilar Aluminum Alloys*". *Int. J. Mech. Eng. Technol. (IJMET)*, 25–38. 2011

[48] Montgomery DC: "*Design and analysis of experiments. 2nd ed. New York*": John Wiley and Sons, 19

Web graphie

[28] <http://www.twi.co.uk/j32k/unprotected>

Annexe

Annexes

AA6XXX est une série de ressources de construction les plus couramment utilisées dans les industries automobile, le transport ferroviaire et aéronautique.

Où (AA6061T6) est le plus en alliage d'aluminium utilisé dans cette série et a une soudabilité supérieure avec d'autres alliages traités thermiquement et est la plus populaire extrusion d'alliage d'aluminium [45].

Cette étude présente l'effet des paramètres régissant le soudage par friction-malaxage (FSW) sur les propriétés mécaniques et la qualité de la soudure d'un joint bout à bout en alliage d'aluminium 6061 T6 de 6 mm d'épaisseur. Les principaux paramètres FSW, la vitesse de rotation et la vitesse d'avance à été optimisés en fonction de propriétés mécaniques et de qualité multiples, qui mettent l'accent sur la résistance à la traction, la dureté et la classe de qualité de soudure à l'aide de la méthode Taguchi. (Mohamed Ackiel Mohamed, et, al [38].

Une conception de Taguchi, ou une matrice orthogonale, est une méthode simple et robuste de conception d'expériences pour optimiser les paramètres du processus de gouvernance qui nécessite habituellement seulement une fraction des combinaisons factorielles complètes. Cette technique permet à chaque facteur d'être évalué indépendamment avec des expériences aléatoires en raison de la matrice orthogonale (MO) [17, 20,22].

Tableau 6 : les facteurs de contrôle et leurs niveaux utilisés dans la matrice de conception

Symbole	Facteurs	1	2	3
A	N (tr/min)	650	950	1400
B	V _a (mm/s)	0.78	1.42	4.55

Les pseudo-codes ci-dessous explicitent l'implémentation sous Matlab™ par les fonctions « fitness » de l'algorithme P-NSGA-II, respectivement pour les problèmes d'optimisation en soudage par friction.

- **Bi-objectifs avec contrainte**

```
function [y, cons] = TP_objfun_with_MC(x)
% Objective function : Test problem 'TNK'.
%*****

y = [0,0];
cons = 0;

%objectives
y(1)= -(162.22+0.036*x(1)+12.297*x(2)-0.0055*x(1).*x(2)); % equal2;

y(2)=- (4.7-0.00225*x(1)-1.7611*x(2)+0.00206*x(1).*x(2)); % equal6;

%constraints
Dpmax=65;

c = 73.57 -0.0041*x(1)-12.65*x(2) +0.015*x(1).*x(2)-Dpmax; % equal9;
if(c>0)
    cons(1) = abs(c);
end

end
```

- **Execution Sous MATLAB**

```
%*****
% Test Problem : 'TP_KUR_objfun'
% Description:unconstrained bi-objectives problem
%
%*****

options = nsgaopt(); % create default options structure
options.vartype = [1 1];
options.popsize = 70; % populaion size
options.maxGen = 500; % max generation
options.numObj = 2; % number of objectives
options.numVar = 2; % number of design variables
options.numCons = 1; % number of constraints
options.lb = [650 0.78]; % lower bound of x
options.ub = [1400 4.55]; % upper bound of x
options.objfun = @TP_objfun_with_MC2; % objective function handle
options.plotInterval = 2; % interval between two calls of
"plotnsga".
result = nsga2(options); % begin the optimization!
```

- **Multi-objectifs sans contraintes**

```

function [y,cons] = TP_objfun_with_MC2(x)
% Objective function : Test problem 'TNK'.
%*****

y = [0,0,0];
cons = [];

%objectives
y(1)= -(162.22+0.036*x(1)+12.297*x(2)-0.0055*x(1).*x(2)); % equal12;

y(2)=- (4.7-0.00225*x(1)-1.7611*x(2)+0.00206*x(1).*x(2)); % equal16;
y(3)= 73.57 -0.0041*x(1)-12.65*x(2) +0.015*x(1).*x(2);% equal19;

%constraints
%Dpmax=65;

%c = 73.57 -0.0041*x(1)-12.65*x(2) +0.015*x(1).*x(2)-Dpmax; % equal19;
%if(c>0)
%cons(1) = abs(c);
%end

end

```

- **Execution sous MATLAB**

```

%*****
% Test Problem : 'TP_KUR_objfun'
% Description:unconstrained bi-objectives problem
%
%*****

options = nsgaopt(); % create default options structure
options.vartype =[1 1];
options.popsize = 70; % populaion size
options.maxGen = 500; % max generation
options.numObj = 3; % number of objectives
options.numVar = 2; % number of design variables
options.numCons = 0; % number of constraints
options.lb = [650 0.78]; % lower bound of x
options.ub = [1400 4.55]; % upper bound of x
options.objfun = @TP_objfun_with_MC2; % objective function handle
options.plotInterval = 2; % interval between two calls of
"plotnsga".
result = nsga2(options); % begin the optimization!

```

On a le modèle R_t et D_p et Q :

$$R_t = 162.22 + 0.036N + 12.297V_a - 0.0055NV_a$$

$$190 \leq R_t \leq 230$$

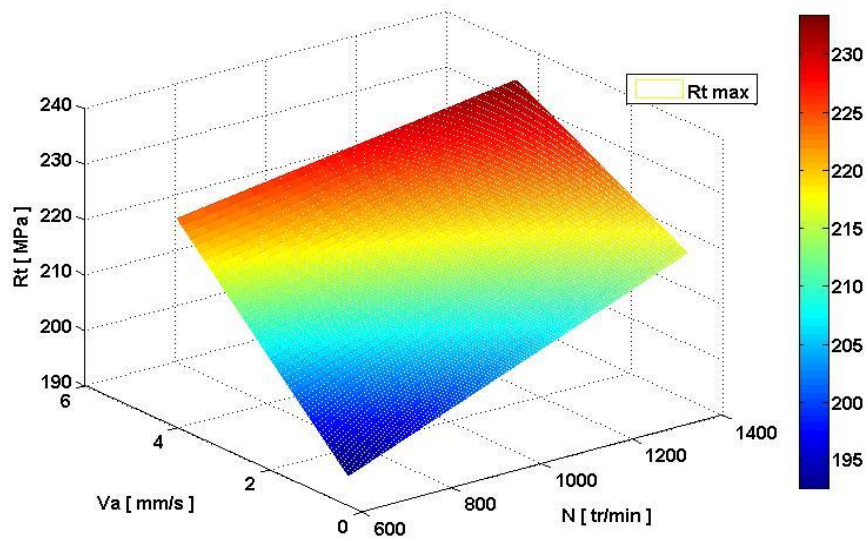


FIGURE 1 : Le modèle R_t en fonction (N , V_a)

$$D_p = 73.57 - 0.0041N - 12.65V_a + 0.015NV_a$$

$$54.1 \leq D_m \leq 65$$

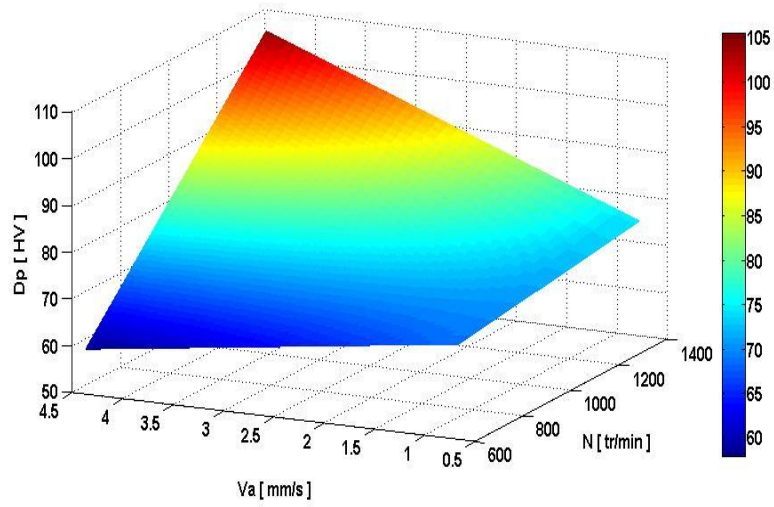


FIGURE : Le modèle Dp en fonction (N, Va)

$$Q = 4.7 - 0.00225N - 1.7611V_a + 0.00206NV_a$$

$$0.55 \leq Q \leq 6.66$$

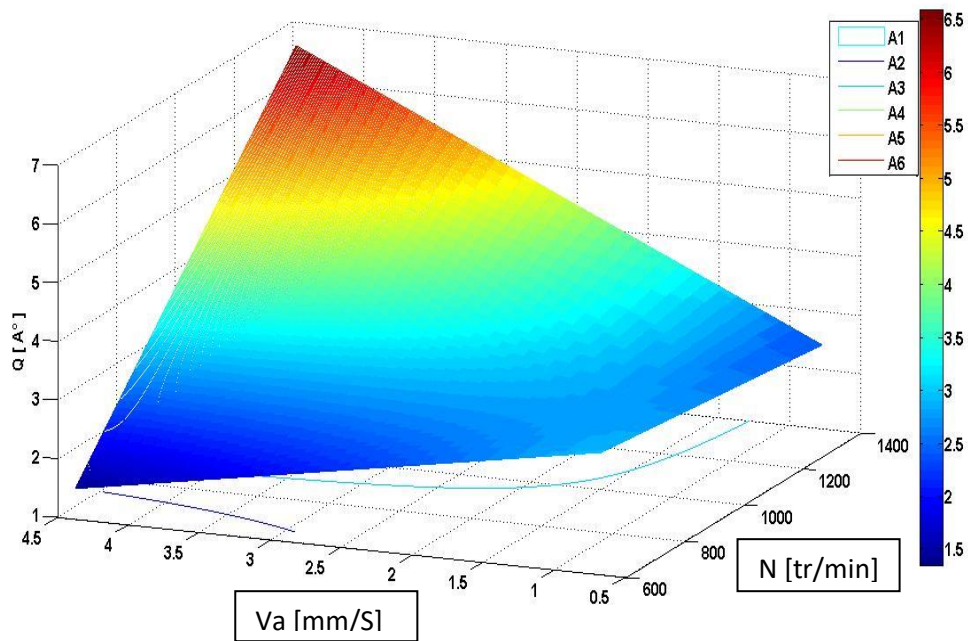


FIGURE : Le modèle Q en fonction (N, Va)

Le modèle de surface de réponse linéaire établi pour la prédiction de la résistance à la traction, de la dureté de la pépite et de la qualité de la classe de soudure s'est avéré bien ajusté.

Le test de confirmation a validé l'utilisation de méthode d'optimisation multi-objectifs pour améliorer les performances de soudage et optimiser les paramètres de soudage dans le procédé FSW.