

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE- AIN TEMOUCHENT –BELHADJ BOUCHAIB

FACULTE DES SCIENCE ET DE TECHNOLOGIE

Département de Génie mécanique



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER EN :

DOMAINE:SCIENCE ET TECHNOLOGIE

FILIER : MECANIQUE

SPECIELITE: CONSTRUCTION MECANIQUE

Thème

Etude paramétrique du phénomène de soudage du PEHD par FSW

Présenté Par :

1_ ADDA ATTOU Ahmed

2_ GOUMID Alaa Eddine

Nom & Prénom

Grade & Etablissement

EN Qualité de

MOHAMED.SERIER

Pr. UBB AIN TEMOCHENT

Encadreur

BOUAFIA FARIDA

Pr. UBB AIN TEMOCHENT

Juré

CHRAYET HOUDA

Dr. UBB AIN TEMOCHENT

Juré

Année Universitaire 2023/2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je remercie le bon Dieu de m'avoir donné la

Puissance pour achever mes études supérieures.

Je tiens à remercier en premier lieu mon encadrant le

*Professeur SERIER **Mohammed** pour ses remarques, ses*

Conseils considérables et ces critiques constructives.

Mes remerciements vont également à tout le personnel du

Département de génie mécanique de l'université Belhadj bochaib

Pour leurs interventions et leur aide.

Remerciement et gratitude vont également aux membres de

Jury qui a accepté de juger mon travail.

Ainsi qu'à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la

Réalisation de ce modeste travail

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A ceux qui m'ont toujours encouragé pour que je réussisse

Dans mes études

A ceux qui ont veillé pour mon bien être

A ceux qui m'ont soutenu dans les moments les plus difficiles

De ma vie

Ceux que j'aime et je respecte infiniment

Le jour est venu pour leur dire Merci...

A tous les travailleurs de l'université Belhadj bochaib

En particulier les travailleurs du département génie

Mécanique

A tous mes amis qui ont toujours été présents et qui n'ont

Ménagé aucun effort pour me bénéficier avec leur aide et leurs

Suggestions

AHMED

Dédicaces

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de mémoire, SREIR Mohamed, pour son encadrement, sa patience et sa confiance tout au long de ce travail de recherche. Ses précieux conseils, son expertise et son soutien inébranlable ont été d'une aide inestimable et ont grandement contribué à l'aboutissement de ce projet.

Mes remerciements vont également à l'ensemble des professeurs du Département de Génie Mécanique d'Université Belhadj bouchaib Pour leur enseignement de qualité et les connaissances qu'ils m'ont transmises durant mes années d'études.

ALAA

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : Soudage par friction malaxage(FSW)

Figure I.1. Schéma technique décrivant le mécanisme de soudage par friction malaxage [43]	13
Figure I.2. Plateforme de soudage par friction malaxage assisté électriquement (a) Représentation schématique de l'installation complète. (b) Schéma de l'outil utilisé pour L'EFSW.....	14
Figure I.3. Détails concernant l'outil de soudage par friction malaxage auto-réactif... 15	
Figure I.4. Schémas du procédé conventionnel de Soudage par Points par Friction Malaxage : (a) Rotation, (b) Plongée, (c) Malaxage (temps de maintien), (d) Retrait. [65]	15
Figure I.5. Les trois phases de procédé de soudage FSW [67]	16
Figure I.8. Trou à la fin de soudure [71].	17
Figure I.9. Les différentes configurations de soudage effectuées par FSW : (a) bout à bout, (b) en coin, (c) en T, et (d) angle [30]	18
Figure I.10. Vue en coupe transversale du joint soudé: a) Noyau ; b) Zone affectée Thermo mécaniquement (ZATM) ; c) Zone affectée thermiquement (ZAT) et d) Matériau de base.....	20
Figure I.13. Effet de la force de plongée de l'outil sur la formation du joint. [110].....	23
Figure I.14. Les paramètres du procédé FSW.....	24
Figure I.15. Les technologies d'outils existants (a) Outil conventionnel, (b) Outil à pion rétractable et (c) Outil à deux épaulements et un pion ajustable verticalement.....	24
Figure I.16. Ares I.....	29
Figure I.17. (a) : Des supports de lumières, (b) : Des tôles en CU-OF, (c) Des éléments de générations.....	30

Chapitre II : les polymères de PEHD

Figure. II.1. Molécule polyéthylène	32
Figure II.2. le label PEHD	35

Chapitre III : modélisation par la méthode des plans d'expériences

Figure II.1. Schéma simplifié de l'environnement d'un système donné	48
Figure II.2. Le domaine de variation du facteur est constitué de toutes les valeurs ...	49
Figure II.3. L'espace expérimental	50
Figure II.4. La surface de réponse.	51
Figure II.5. L'optimisation de la réponse	51
Figure II.6. Plans factoriels complets 2^2 et 2^3	54

Chapitre IV : Résultats et discussions

Figure IV.1. Régions/interfaces de l'entrée des énergies et de la géométrie de l'outil du Procédé FSW.....	66
Figure IV.2. Diagramme à barres montrant les effets de divers facteurs et leurs interactions sur une réponse variable.....	69
Figure IV.3 Rapport entre les deux modèles.....	70
Figure IV.4 Les graphiques suivants montrent la relation entre la température et trois variables	70
Figure IV.5 effet d'interaction	71

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I : Soudage par friction malaxage(FSW)

Tableau I.1. Les technologies d'outils existants	25
--------------------------------------------------------	----

Chapitre II : les polymères de PEHD

Tableau II.1.différents types de polyéthylène	33
-----------------------------------------------------	----

Chapitre III:modélisation par la méthode des plans d'expériences

Tableau III.1. Organisation des matrices d'expériences dans le contexte des plans factoriels Complets 22	54
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Tableau III.2. Organisation des matrices d'expériences dans le contexte des plans factoriels Complets 23	55
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Tableau III.3. Matrice d'expériences avec réponses pour un plan factoriel complet 22.....	56
-------------------------------------------------------------------------------------------	----

Tableau III.4. Matrice d'expériences avec effets pour un plan factoriel complet 22....	58
----------------------------------------------------------------------------------------	----

Tableau III .5. Tableau dANOVA.....	61
-------------------------------------	----

Chapitre IV : Résultats et discussions

Tableau IV.1 résultats expérimentaux (plan complet à deux n).....	67
-------------------------------------------------------------------	----

Tableau IV.2.matrice expérience (valeurs codées).....	68
-------------------------------------------------------	----

Tableau IV.3. Coefficients du modèle.....	69
-------------------------------------------	----

Sommaire:

RÉSUMÉ	1
ABSTRACT.....	2
ملخص.....	3
INTRODUCTION GÉNÉRALE	4

Chapitre I : Soudage par friction malaxage(FSW)

I.1. INTRODUCTION	5
I.2. LE SOUDAGE PAR FRICTION MALAXAGE FSW (FRICTION STIR WELDING).....	5
I.2.1. ÉTAT DE L'ART CONCERNANT LE DOMAINE DE RECHERCHE	5
I.2.2. DÉFINITION	12
I.2.3. VARIANTES DU FSW ET DES MÉTHODES CONNEXES	13
I.3. LE PRINCIPE DE SOUDAGE PAR FRICTION MALAXAGE FSW.....	16
I.3.1. PHASE DE PLONGÉE.....	16
I.3.2. PHASE DE SOUDAGE.....	16
I.3.3. PHASE DE RETRAIT.....	17
I.4. LES DIFFÉRENTES CONFIGURATIONS POSSIBLES POUR LE SOUDAGE FSW.....	17
I.5. LES MATÉRIAUX CONSIDÉRÉS.....	18
I.5.1. MATÉRIAUX SOUDABLES PAR FSW	18
I.5.2. POSSIBILITÉ D'ASSEMBLAGE HÉTÉROGÈNES	19
I.6. STRUCTURE GÉNÉRALE DES ASSEMBLAGES OBTENUS PAR FSW (LA	

MICROSTRUCTURE)	20
I.6.1. LA ZONE AFFECTÉE THERMIQUEMENT (ZAT ; HAZ : HEAT AFFECTED ZONE)	20
I.6.2. LA ZONE AFFECTÉE THERMOMÉCANIQUEMENT (ZATM; TMAZ THERMOMECHANICALLY AFFECTED ZONE).....	20
I.6.3. LE NOYAU SOUDÉ (NUGGET)	21
I.7. PARAMÈTRES DU SOUDAGE FSW	21
I.7.1. PARAMÈTRES DU PROCÉDÉ	21
I.7.2. PARAMÈTRES OUTILS	24
I.8. AVANTAGE ET INCONVÉNIENTS DU FSW.....	26
I.8.1. AVANTAGES	26
I.8.2. INCONVÉNIENT	28
I.9. LES DOMAINES D'APPLICATIONS	28
I.9.1. DOMAINE AUTOMOBILE	28
I.9.2. DOMAINE FERROVIAIRE	28
I.9.3. DOMAINE AÉRONAUTIQUE	28
I.9.4. DOMAINE SPATIAL	29
I.9.5. AUTRES DOMAINES D'APPLICATION	29
I.10. CONCLUSION	30

Chapitre II : les polymères de PEHD

II.1. Introduction.....	31
II.2. Définition LE polyéthylène.....	32
II.3. Classification de polyéthylène.....	32
II.4. Définition LE polyéthylène haute densité (PEHD).....	34
II.5. Recyclage Du PEHD.....	34
II.6. Fabrication.....	35
II.6.1 Historique.....	35
II.6.2 Procédés de polymérisation.....	36

II.7. Méthodes de contrôle.....	37
II.7. 1.Cristallinité.....	37
II.7. 2.Masse molaire.....	37
II.8. Principales propriétés du PEHD.....	37
II.8.1.Propriétés mécanique	37
II.8.2.Propriétés physiques.....	38
II.8.3.Propriétés thermiques	38
II.8.4.Résistances chimique.....	38
II.8.5.Comportement aux rayonnements.....	39
II.9. Avantages et les limitations du PEHD.....	39
II.9.1 Avantages.....	39
II.9.2.Les limitations du PEHD.....	40
II.10. Domaines d’application du PEHD	41
II.10.1. Films	41
II.10.2.Objets moulés.....	41
II.10.3.Extrusion-soufflage.....	41
II.10.4.Tuyaux	41

Chapitre III:modélisation par la méthode des plans d'expériences

III.1. INTRODUCTION	43
III.2. PLANS D’EXPÉRIENCES	44
III.2.1. DÉFINITION	44
III.2.2. LES ÉTAPES DE LA DÉMARCHE DES PLANS D’EXPÉRIENCES	46
III.2.3. LES AVANTAGES	46
III.3. LA MÉTHODE DE SURFACE DE RÉPONSE (MSR)	47
III.3.1. DÉFINITION	47

III.4. NOTION D'ESPACE EXPÉRIMENTAL	49
III.5. NOTION DE SURFACE DE RÉPONSE	50
III.6. OBJECTIF DE MODÉLISATION	50
III.6.1. OBJECTIF DE PRÉDICTION	50
III.6.2. OBJECTIF D'OPTIMISATION	51
III.7. PRINCIPES DE BASE DE LA MODÉLISATION MATHÉMATIQUE	52
III.7.1. LES ASPECTS CLÉS DE LA RÉGRESSION LINÉAIRE MULTIPLE DANS LE CONTEXTE DE LA MODÉLISATION.....	52
III.7.2. VARIABLES CODÉES	53
III.8. PLANS FACTORIELS	53
III.8.1. PLANS FACTORIELS COMPLETS À DEUX NIVEAUX	53
III.8.2. MATRICE D'EXPÉRIENCES	54
III.8.3. EFFETS GLOBAUX ET EFFETS MOYENS	56
III.8.4. RÉGRESSION LINÉAIRE ET ANALYSE DU MODÈLE	58
III.9. LOGICIELS DE PLANS D'EXPÉRIENCES	63
III.10. CONCLUSION	64

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1. INTRODUCTION	66
IV.2. ÉTUDE EXPÉRIMENTALE.....	66
IV.3. RÉSULTAL.....	67
III.3.1. FORMULE GLOBALE DU MODELE MATHEMATIQUE Formule.....	68
IV.4. VALIDATION DU MODÈLE.....	70
IV.5. INTERPRÉTATION DES RÉSULTAL.....	70
IV.5.1. EFFET D'UN SEUL FACTEUR	70
IV.5.2.EFFET DES INTERACTIONS.....	71
IV.6. CONCLUSION.....	72

Résumé

Résumé

Le FSW, ou soudage par friction-malaxage, est un procédé de soudage à l'état solide. Cette technique innovante n'exige pas la fusion complète des matériaux. Elle utilise un outil spécial qui, grâce à un pion en rotation, amène les pièces à assembler à un état pâteux. Bien que le FSW soit principalement utilisé pour les alliages d'aluminium, il peut également être appliqué à d'autres matériaux. Parmi ses avantages, on trouve la réduction des défauts de soudure, la préservation des propriétés des matériaux et la capacité de souder des matériaux dissemblables.

Cette thèse vise à comprendre les aspects thermiques et mécaniques impliqués dans ce procédé innovant de soudage. Lors de l'étude du soudage par friction-malaxage (FSW), l'utilisation de plans d'expériences est essentielle pour évaluer la qualité des soudures.

Cette étude utilise la modélisation du transfert de chaleur et la simulation numérique pour comprendre le processus de FSW. Elle vise à développer et appliquer des modèles de transfert de chaleur afin de générer trois interfaces majeures qui produisent un flux thermique entre l'outil et le matériau.

Mener des expériences pratiques de FSW pour valider les résultats numériques et garantir l'applicabilité de l'étude dans des conditions réelles.

Des expériences ont été réalisées en variant deux paramètres. Pour mesurer la température dans la zone de soudage, ces expériences ont été menées sur deux plaques de PEHD. L'étude examine comment les variations de la vitesse de soudage et de la vitesse de rotation affectent les aspects thermiques et mécaniques du FSW.

Résumé

Abstract

FSW, or friction stir welding, is a solid-state welding process. This innovative technique does not require the complete fusion of materials. It uses a special tool which, thanks to a rotating pin, brings the parts to be assembled to a pasty state. Although FSW is primarily used for aluminum alloys, it can also be applied to other materials. Among its advantages are the reduction of weld defects, the preservation of material properties and the ability to weld dissimilar materials.

This thesis aims to understand the thermal and mechanical aspects involved in this innovative welding process. When studying friction stir welding (FSW), the use of experimental designs is essential to evaluate weld quality.

This study uses heat transfer modeling and numerical simulation to understand the FSW process. It aims to develop and apply heat transfer models to generate three major interfaces that produce heat flow between the tool and the material.

Conduct practical FSW experiments to validate the numerical results and ensure the applicability of the study in real-world conditions.

Experiments were carried out by varying two parameters. To measure the temperature in the welding zone, these experiments were carried out on two HDPE plates. The study examines how variations in welding speed and rotational speed affect the thermal and mechanical aspects of FSW.

Résumé

ملخص

FSW، أو اللحام بالتحريك الاحتكاكي، هو عملية لحام بالحالة الصلبة. لا تتطلب هذه التقنية المبتكرة الدمج الكامل للمواد. إنها تستخدم أداة خاصة، بفضل دبوس دوار، تجعل الأجزاء المراد تجميعها في حالة طرية. على الرغم من أن FSW يستخدم في المقام الأول لسبائك الألومنيوم، إلا أنه يمكن تطبيقه أيضًا على مواد أخرى. ومن مزاياها تقليل عيوب اللحام والحفاظ على خصائص المواد والقدرة على لحام مواد مختلفة.

تهدف هذه الأطروحة إلى فهم الجوانب الحرارية والميكانيكية المرتبطة بعملية اللحام المبتكرة هذه. عند دراسة اللحام بالتحريك الاحتكاكي (FSW)، يعد استخدام التصميمات التجريبية أمرًا ضروريًا لتقييم جودة اللحام.

تستخدم هذه الدراسة نمذجة نقل الحرارة والمحاكاة العددية لفهم عملية FSW. ويهدف إلى تطوير وتطبيق نماذج نقل الحرارة لتوليد ثلاث واجهات رئيسية تنتج تدفق الحرارة بين الأداة والمادة.

إجراء تجارب FSW العملية للتحقق من صحة النتائج العددية وضمان قابلية تطبيق الدراسة في ظروف العالم الحقيقي.

تم إجراء التجارب من خلال عمليتين مختلفتين. لقياس درجة الحرارة في منطقة اللحام، تم إجراء هذه التجارب على لوحين من مادة HDPE. تبحث الدراسة في كيفية تأثير الاختلافات في سرعة اللحام وسرعة الدوران على الجوانب الحرارية والميكانيكية لـ FSW.

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Le procédé de soudage par friction-malaxage, connu sous le nom de « Friction Stir Welding (FSW) », a été inventé par le Welding Institute (TWI) en Grande-Bretagne pour répondre à des besoins importants dans les secteurs du transport aérien, naval et ferroviaire. Classé parmi les techniques d'assemblage les plus récentes, il est considéré comme une innovation majeure du 21^{ème} siècle.

La demande croissante pour l'économie d'énergie dans divers secteurs industriels a conduit à l'utilisation d'alliages légers et d'aciers à haute résistance. Cet intérêt accru a rendu nécessaire le développement de technologies de soudage fiables, capables de permettre des processus de fabrication multi-matériaux, tout en réduisant les coûts et en améliorant la conception. Le soudage par friction-malaxage (Friction Stir Welding, FSW) est un procédé de soudage thermomécanique qui répond à ces exigences. Dans ce procédé, un outil avec un épaulement et un pion en rotation rapide pénètre dans deux tôles superposées à assembler. La chaleur générée par le frottement de l'outil contre les tôles ramollit la matière, permettant au pion de malaxer le matériau des deux tôles pour les souder ensemble.

Le travail du mémoire s'intéresse à étude paramétrique du phénomène de soudage du PEHD par fsw. IL s'articule en quatre chapitres

Chapitre I : un aperçu sur l'histoire, le développement, le mode d'emploi et les différentes techniques de soudage par flexion malaxage.

Chapitre II: historique et les avantages et les principes de PEHD

Chapitre III:modélisation par la méthode des plans d'expériences

Chapitre IV: commence par le développement d'un modèle mathématique pour l'analyse des effets facteurs principaux et les effets des interactions.

Chapitre I

I.1. Introduction

Une des méthodes d'assemblage les plus couramment utilisées dans l'industrie est le soudage. Ce secteur a subi des changements significatifs au fil des décennies, avec l'introduction de nouvelles technologies visant à améliorer l'efficacité, la qualité et la diversité des jonctions soudées dans divers secteurs industriels. Parmi ces avancées majeures, le procédé de soudage par friction-malaxage, également connu sous le nom de FSW, s'est démarqué comme une technique révolutionnaire offrant des avantages notables pour la réalisation de jonctions métalliques. Cette méthode se révèle particulièrement efficace pour souder des alliages connus pour leur difficulté à être travaillés avec les techniques de soudage conventionnelles.

Dans ce chapitre, nous explorerons en profondeur le concept physique du soudage par friction-malaxage, en détaillant les différentes phases du processus, les systèmes employés, ainsi que les principaux facteurs qui influent sur la qualité de la soudure. Nous examinerons également les diverses applications industrielles qui ont tiré profit de cette méthode révolutionnaire, tout en analysant l'état actuel de l'art en matière de soudage FSW. De plus, nous aborderons les aspects métallurgiques et mécaniques des assemblages obtenus grâce à cette technique innovante

I.2. Le soudage par friction malaxage FSW (Friction Stir Welding) :

I.2.1. État de l'art concernant le domaine de recherche

Serier et ses collègues [2] ont examiné la modélisation thermomécanique du processus de soudage par friction-malaxage, spécifiquement adapté à l'assemblage d'alliages d'aluminium. Ils ont introduit une première modélisation de ce processus dans le logiciel d'éléments finis ABAQUS/Explicit, dans le but à long terme de développer un outil prédictif pour identifier les paramètres de soudage optimaux. Leur étude a exploré diverses approches en prenant en compte la complexité du processus ainsi que les données expérimentales disponibles. Les simulations numériques ont efficacement anticipé les champs de température et de contrainte mécanique.

Elangovan et Balasubramanian [3] ont examiné le processus de soudage par friction-malaxage de l'alliage d'aluminium AA2219. Leur étude s'est principalement concentrée sur l'impact de la vitesse de rotation et du profil de la broche de l'outil sur la formation de la zone affectée par le processus de friction-malaxage ainsi que sur les caractéristiques de traction des joints. Leurs résultats ont montré que le profil de broche de forme carrée a généré des soudures robustes du point de vue mécanique, sans défauts métallurgiques, ce qui les distingue favorablement des autres profils de broche.

Sakthivel et ses collaborateurs. [4] ont examiné l'effet de différentes vitesses de soudage par friction-malaxage sur les caractéristiques des soudures en aluminium, en

maintenant une vitesse de rotation constante de 1000 tr/min. Ils ont travaillé avec deux plaques d'aluminium mesurant 300×150×6 mm et un outil en acier durci pour le processus de soudage, puis ont analysé les propriétés mécaniques ainsi que la microstructure des soudures. Une corrélation significative a été observée entre les propriétés mécaniques et les vitesses de soudage. Leur conclusion met en évidence que les meilleures propriétés mécaniques sont obtenues avec des vitesses de soudage plus basses.

Guedoiri et ses collaborateurs. [5] ont employé une plaque fabriquée en alliage d'aluminium 6061, de dimensions 50 mm de long sur 6 mm d'épaisseur, afin de simuler le procédé de soudage par friction-malaxage (FSW). Ils ont restreint leur modélisation à une zone représentant 50% de la longueur totale de la plaque. Cette zone a été simulée en utilisant un outil de soudage en acier équipé d'une broche de 5 mm de diamètre et d'une épaulement de 10 mm de diamètre, avec une longueur totale de 30 mm. Les paramètres opérationnels du FSW ont été fixés à une vitesse de soudage de 1 mm/s et une vitesse de rotation de 42 rad/s. L'objectif principal était d'examiner les conditions thermiques optimales pour cette zone spécifique et leur impact sur la simulation du FSW. Pour ce faire, deux modèles ont été développés : un modèle thermomécanique pour la zone adjacente à l'outil de soudage et un modèle thermique englobant l'intégralité de la pièce, y compris l'outil et la plaque de support en acier. Une méthode itérative a été employée pour parvenir à la convergence des modèles.

Jemal [6] a employé des modèles thermomécaniques pour analyser le flux du matériau et la répartition de la chaleur lors du soudage par friction-malaxage, démontrant ainsi leur efficacité dans la prédiction des contraintes résiduelles, des forces et des déformations. Cette recherche a mis en lumière l'importance cruciale du soudage par friction-malaxage, notamment dans les situations où la mesure de la température est difficile dans les zones soumises à une forte déformation plastique. Leur étude a donc contribué à l'avancement et à l'amélioration de la technique du FSW. De plus, ils ont suggéré des améliorations pour les modèles thermomécaniques existants en proposant de peaufiner les hypothèses et d'augmenter la précision des équations mathématiques pour les études futures.

Xiaocong et ses collègues. [7] présentent dans leur étude une analyse exhaustive des récentes publications portant sur l'utilisation des méthodes éléments finis pour étudier le comportement thermomécanique du soudage par friction-malaxage (FSW). Ils se concentrent particulièrement sur l'utilisation de modèles thermomécaniques pour étudier le flux de matière et la distribution de la température pendant le processus de FSW. Leur étude met en évidence l'efficacité de ces modèles dans la prédiction des contraintes, des forces et des déformations résiduelles, soulignant ainsi l'importance cruciale de la FEA, notamment pour surmonter les difficultés liées à la mesure de la température dans des zones subissant une forte déformation plastique.

Cette recherche apporte une contribution significative à l'avancement et à l'amélioration de la technique FSW. Pour les futures recherches, les auteurs recommandent de concentrer les efforts sur l'amélioration des modèles thermomécaniques existants, en affinant les hypothèses et en augmentant la précision des équations mathématiques. Ils soulignent également l'importance de valider expérimentalement ces modèles numériques afin d'assurer leur fiabilité et leur précision dans la prédiction du comportement des joints FSW. De plus, ils encouragent à prendre en compte l'impact des différents outils et paramètres de processus sur le comportement thermomécanique des joints, ce qui représente un axe de recherche essentiel pour l'avenir.

Dialami [8] et ses collègues ont examiné une simulation informatique des problèmes thermomécaniques rencontrés dans le FSW. Leur analyse visait à comprendre comment une source de chaleur mobile affecte une structure dans son ensemble, en se concentrant particulièrement sur la zone thermiquement affectée localement. Leur recherche a exploré divers aspects de la modélisation du FSW, tels que la formulation des modèles, les techniques de stabilisation, la modélisation des matériaux, la visualisation des flux de matière, et le calcul des contraintes résiduelles. Ils ont soulevé les défis liés à la complexité des phénomènes thermomécaniques et à la nécessité de prendre en compte la vitesse de rotation élevée, en se focalisant sur l'analyse de la zone thermiquement affectée, ce qui a contribué à une meilleure compréhension des processus de soudage.

Serier et ses collègues . [9] ont étudié l'impact de la vitesse de rotation, de la vitesse de soudage, ainsi que de la force axiale de l'outil sur la soudure, en les regroupant dans un modèle mathématique afin d'évaluer leur influence. L'objectif de cette recherche était d'analyser la résistance à la traction du cordon de soudure afin de qualifier ce type de pièces pour des applications spécifiques. Les résultats ont montré que la résistance à la traction du joint soudé est principalement affectée par la vitesse de rotation de l'outil, avec une résistance accrue observée à des vitesses plus basses. En revanche, la combinaison de la vitesse de soudage et de la force axiale n'a pas eu d'impact significatif sur cette résistance.

Serier et ses collègues. [10] ont examiné en détail les facteurs clés influençant le processus de soudage par friction-agitation (FSW) ainsi que l'impact de l'élasticité des matériaux assemblés. Leur étude a porté sur le soudage de plaques en alliage 7075-T5 de dimensions 100×100×4 mm. Leurs résultats ont indiqué que pour minimiser le phénomène de retour élastique, il est préférable d'opter pour des vitesses élevées tant pour l'outil que pour le processus de soudage, tandis que la force axiale semble avoir un effet négligeable. Ils ont validé leur modèle en utilisant le test de Fisher, confirmant ainsi son importance globale. Les paramètres optimaux ont été déterminés avec une vitesse de rotation de l'outil de 1400 tr/min, une vitesse de soudage de 75 mm/min et une force axiale de 4 KN, produisant ainsi le moindre retour élastique. En résumé, cette

étude a mis en place un modèle prédictif efficace permettant de combiner le soudage FSW avec le pliage.

Soori [11] et ses collaborateurs ont employé la méthode des éléments finis (MEF) pour modéliser et examiner le flux de matériau lors du FSW. Leur étude a révélé qu'il est possible d'analyser et d'optimiser l'impact de divers paramètres de soudage, tels que la rotation de l'outil, la vitesse de soudage, l'angle, la profondeur et le diamètre de l'épaule de l'outil, afin d'améliorer l'efficacité de ce processus de production.

Singh [12] et ses collaborateurs ont étudié l'alliage d'aluminium AA 6061-T6, en se concentrant spécifiquement sur le processus de soudage par friction-agitation. À l'aide de la méthode des éléments finis, leur étude a examiné la répartition de la température et des contraintes thermiques pendant ce processus. Ils ont comparé l'effet du diamètre de l'épaule de l'outil et de l'angle du cône sur la température maximale et les contraintes thermiques générées. Leurs résultats ont montré qu'un outil avec un diamètre de 24 mm et un angle de cône de 7° atteignait une température maximale de 730,69 K, dépassant celle obtenue avec un outil à épaule plate de même diamètre de plus de 6%. De plus, la contrainte thermique maximale en traction a été observée lors de l'utilisation d'un outil à épaule plate avec un diamètre de 24 mm.

Kumar et ses collègues [13] ont analysé le procédé de soudage par friction-agitation appliqué à deux alliages d'aluminium distincts, le AA2014 et le AA7075. Leur étude visait à évaluer l'impact de différents paramètres de soudage, tels que la vitesse de soudage, l'angle d'inclinaison de l'outil et la vitesse de rotation, sur les caractéristiques de traction des joints soudés. Leurs résultats indiquent que l'angle d'inclinaison de l'outil exerce une influence plus significative sur les propriétés de soudure que les autres paramètres étudiés.

Khalaf [14] et ses collègues ont étudié comment le refroidissement par eau affecte les contraintes résiduelles lors du soudage par friction-agitation (FSW) de l'AA6068-T6. Ils ont utilisé la méthode de la dynamique des fluides computationnelle (DFC) pour simuler la génération de chaleur lors du FSW et du FSW submergé. Leurs résultats indiquent que le matériau se ramollit davantage lors du FSW par rapport au FSW submergé, ce qui entraîne des contraintes résiduelles moins importantes dans ce dernier cas. Toutefois, les contraintes résiduelles maximales observées dans les deux scénarios restent en dessous de la limite d'élasticité de l'AA6068-T6.

Leon [15] et ses collègues ont développé un modèle thermomécanique basé sur le couple pour les outils à broche cylindrique. Ils ont incorporé des coefficients de multiplication pour les profils de broche polygonale. Une comparaison entre ce nouveau modèle analytique et un modèle préexistant a été effectuée afin d'évaluer sa précision. Les résultats ont montré que la température maximale du processus est directement liée au nombre de côtés de la broche de l'outil.

Al-Sabur [16] a examiné diverses recherches et approches visant à prédire la résistance à la traction lors du soudage par friction-malaxage (FSW). Les résultats de cette analyse mettent en évidence l'efficacité et la précision de la méthode des surfaces de réponse (RSM) dans ce contexte, soulignant son rôle crucial dans l'amélioration du processus de soudage et dans l'assurance de la qualité des soudures. Les conclusions de cette étude revêtent une importance particulière pour l'industrie du soudage, en ouvrant des perspectives pour l'optimisation des techniques de FSW et le développement de modèles prédictifs avancés. De plus, elle offre des insights précieux sur l'adoption de stratégies de modélisation avancées pour renforcer la qualité et la sécurité des soudures.

Sun et ses collègues [17] ont décrit un test utilisant le soudage par friction pour évaluer le coefficient de friction entre l'outil et la pièce, en variant la vitesse de rotation de l'outil. Ils ont établi un modèle de dynamique des fluides numériques (CFD) intégré pour le soudage par friction-malaxage (FSW), prenant en compte le coefficient de friction de la matrice et la limite de vitesse, afin de simuler le transfert de chaleur et de matière. Cette approche a permis d'obtenir une distribution de vitesse plus réaliste. De plus, ils ont proposé une nouvelle méthode pour estimer la contrainte le long de la ligne de courant, en prenant en considération le taux de contrainte inversé. Leur étude a porté sur les effets de la contrainte sur la section transversale de la soudure, mettant en évidence une contrainte plus élevée du côté avançant (AS) par rapport au côté reculant (RS), avec une augmentation à mesure que la distance par rapport à la surface de l'épaulement diminue. La température maximale a été observée à l'avant du côté reculant (RS).

Khalaf et ses collègues [18] ont examiné l'incidence des différentes formes de broche sur le processus de soudage par friction (FSW) des joints en polyéthylène haute densité (HDPE). Ils ont analysé des broches tronquées, cubiques et triangulaires pour évaluer leur effet sur la production de chaleur et le flux de matériau. Leur étude a révélé que les broches comportant davantage de bords génèrent une chaleur accrue, ce qui influe sur la vitesse de déplacement du matériau dans la zone de soudage et la taille de la zone soudée (SZ). Les résultats principaux de leur recherche indiquent que les échantillons utilisant une broche de profil CPT ont généré une chaleur maximale, atteignant environ 96 °C, soit 6% de plus que les échantillons utilisant un profil FPT, où la température atteignait 91 °C. Cette augmentation de la chaleur avec les broches de profil CPT a engendré un flux de chaleur plus important et a favorisé la formation d'une zone soudée (SZ) plus étendue, avec des dimensions allant de 17 mm² à 21 mm² pour les broches FPT, TPT et CPT, soit environ trois fois plus grandes que la zone affectée par la chaleur (HAZ). De plus, la vitesse de déplacement du matériau dans la SZ a augmenté avec le nombre de bords de la broche, ce qui a entraîné un flux interne irrégulier du HDPE, favorisant le sur-brassage et l'emprisonnement d'air dans la ligne de joint.

Asmare et ses collègues [19] ont utilisé l'optimisation des paramètres de soudage par friction de l'alliage d'aluminium 6061-T6 (FSW). Leur étude a combiné une analyse relationnelle grise avec un tableau orthogonal L9 afin d'optimiser des paramètres tels que le profil de l'outil, la vitesse de rotation et la vitesse transversale. Les propriétés mécaniques des joints soudés ont été évaluées à travers des tests de traction, de dureté et de pénétrant liquide. Leurs résultats indiquent que la résistance à la traction et la dureté sont directement proportionnelles à la vitesse de rotation et inversement proportionnelles à la vitesse transversale. Ils ont observé que la résistance à la traction est maximale à des vitesses de rotation élevées et des vitesses transversales basses. La dureté atteint son pic à une vitesse de rotation de 1400 tr/min et une vitesse transversale de 37,5 mm/min. Les tests de pénétrant liquide ont révélé que des vitesses de rotation plus élevées produisaient des joints sans défaut, tandis que des vitesses plus basses présentaient certains défauts.

Boukraa et ses collègues [20] ont réalisé une simulation numérique du processus de Friction Stir Welding (FSW) sur l'alliage AA2195-T8. Pour ce faire, un modèle thermique transitoire en trois dimensions a été employé afin de représenter le transfert de chaleur pendant le processus de soudage. Dans ce modèle, l'outil FSW est considéré comme une source de chaleur circulaire se déplaçant le long d'une plaque rectangulaire. Cette plaque est soumise à des conditions limites de refroidissement qui ne sont ni uniformes ni homogènes. Les résultats de cette simulation ont permis de déterminer la température maximale atteinte dans la zone de joint soudé. De plus, une analyse de sensibilité des paramètres opérationnels a été réalisée afin de comprendre l'impact sur le cycle thermique et la distribution de température pendant le processus de soudage.

Serier et ses collègues [21] ont présenté une méthode novatrice pour rectifier les petites imperfections observées lors du soudage par friction-malaxage (FSW), en concevant un outil doté d'une épaulement à ressort. L'objectif principal était d'assurer une répartition homogène des contraintes de soudage tout en limitant la dissipation thermique de la zone de soudage vers le corps de l'outil grâce à des vibrations harmoniques. De plus, le processus de forgeage harmonique du matériau en fusion a favorisé la formation de joints exempts de défauts. Une validation expérimentale a été réalisée en menant des essais de FSW selon un plan orthogonal. Les résultats de ces essais ont été modélisés et comparés à ceux obtenus avec un outil FSW conventionnel, mettant en évidence la supériorité de l'approche proposée.

Veljić et ses collègues [22] ont examiné comment les paramètres du processus FSW influent sur le comportement thermomécanique de l'alliage d'aluminium Al 2024 T351. À l'aide d'un modèle d'éléments finis, ils ont étudié l'effet de différentes vitesses de rotation et d'avance de l'outil de soudage. Leurs résultats suggèrent que l'augmentation de la vitesse de rotation de l'outil entraîne une augmentation de la chaleur générée par

frottement, tandis que l'impact de l'augmentation de la vitesse d'avance sur la génération totale de chaleur est moins significatif.

Melaku et ses collègues [23] ont examiné de près l'analyse thermique et l'amélioration des joints soudés en alliage AA 6061 par FSW, en variant les vitesses de soudage, les vitesses de rotation et les configurations d'outils. Leur objectif était de parvenir à des joints exempts de défauts en optimisant la température via la méthode des éléments finis. Leurs conclusions ont mis en évidence qu'un outil équipé d'une épaupe concave et d'une sonde conique permettait d'obtenir un joint parfait, avec une vitesse de rotation constante de 1000 tr/min et une vitesse de soudage réglée à 20 mm/min.

Chalurkar et Shukla [24] ont employé un modèle thermomécanique 3D finement détaillé, basé sur l'approche Euler-Lagrange, pour simuler le processus de soudage par friction malaxage (FSW) de l'alliage d'aluminium AA6061-T6. L'objectif était de résoudre les problèmes de déformation à grande échelle. Les résultats de la simulation, validés par des données expérimentales, ont révélé que la température atteinte lors des phases de plongée, de maintien et de soudage dans le FSW de l'alliage AA6061-T6 représente entre 80% et 90% de sa température de fusion.

Mishin et ses collaborateurs [25] ont mis au point un modèle d'analyse par éléments finis afin de simuler le comportement thermomécanique de l'alliage d'aluminium 6061 lors du Friction Stir Welding (FSW). Leur étude a révélé que le processus de déformation engendré par le FSW se déroule en deux phases distinctes : d'abord, l'action de pétrissage exercée par la sonde rotative de l'outil, puis une déformation secondaire causée par le bord de l'épaupe dans la zone de pétrissage. Ils ont également étudié de manière systématique les effets des vitesses de rotation et de translation de l'outil sur la température et la contrainte induites par le FSW, en explorant des plages de température de soudage allant de 360 à 500 °C et des contraintes cumulatives effectives allant de 12 à 45.

Salih et ses collègues [26] ont élaboré un modèle numérique thermomécanique tridimensionnel pour simuler le processus de soudage par friction (FSW) de l'alliage d'aluminium AA 6082-T6. Ils ont adopté l'approche du Couple Eulerien-Lagrangien (CEL). Ce modèle a été efficace pour reproduire les différentes phases du FSW, à savoir la plongée, le maintien et le soudage, en suivant l'évolution de la température, de la déformation plastique et des contraintes résiduelles dans l'assemblage soudé. Les résultats obtenus ont mis en évidence l'impact significatif de la vitesse de rotation de l'outil sur la température et la qualité de la soudure. Une augmentation de la vitesse de rotation a été associée à une élévation de la température maximale et à une réduction de la taille des défauts de type trous.

Sharma et ses collègues [27] ont réalisé une étude numérique approfondie sur le processus de soudage par friction (FSW), englobant divers aspects du processus de

soudage. Leurs conclusions offrent des perspectives précieuses sur les différentes techniques cruciales de fabrication de soudures, et permettent une compréhension fondamentale des mécanismes sous-jacents au FSW pour des matériaux tels que l'acier, le titane et d'autres matériaux difficiles. Ils ont utilisé diverses approches, notamment la mécanique des solides computationnelle (CSM) et la dynamique des fluides computationnelle (CFD), pour caractériser les principes du FSW et modéliser la génération de chaleur. L'étude a également porté sur la simulation de l'écoulement des matériaux dans le cadre d'une approche de modélisation numérique. Les résultats englobent une synthèse des techniques numériques et analytiques de pointe appliquées au FSW pour une gamme variée de matériaux

Singh et Yogesh [28] ont étudié le soudage par friction-malaxage (FSW) de l'aluminium en combinaison avec d'autres métaux. Leur attention s'est portée sur la conception d'un dispositif visant à améliorer le transfert de chaleur lors du processus de FSW. Ils ont introduit un réservoir supplémentaire comme moyen de refroidissement pendant le soudage, ce qui leur a permis de contrôler le flux de chaleur et d'optimiser le transfert thermique durant le FSW. Ils ont ensuite procédé à des analyses microstructurales et à des observations au microscope électronique à balayage (SEM) sur tous les échantillons. Les résultats obtenus ont démontré une homogénéisation accrue ainsi qu'un affinement des grains.

I.2.2. Définition :

En 1991, le TWI a obtenu un brevet pour le Friction Stir Welding [29], Cela marque un progrès significatif dans le domaine du soudage [7, 30, 31], Ce procédé innovant a la capacité d'assembler une variété étendue de matériaux, incluant des alliages complexes tels que ceux à base de magnésium [32, 33], de cuivre, de zinc, d'acier, de titane [34-36] et les composites à matrice métallique [37, 38]. Ce procédé est particulièrement respectueux de l'environnement, réduisant considérablement la consommation d'énergie et éliminant le besoin de consommables tout en évitant les émissions dangereuses typiques des procédés de soudage par fusion [39-41].

Dans le procédé de soudage par friction-malaxage, l'énergie requise pour unir les pièces provient de la transformation de l'énergie mécanique en chaleur. Cette chaleur est utilisée pour assouplir les matériaux à souder. Pendant ce processus, l'outil de soudage applique une pression et tourne contre les pièces à souder, générant de la chaleur par friction qui permet une fusion efficace des matériaux [42].

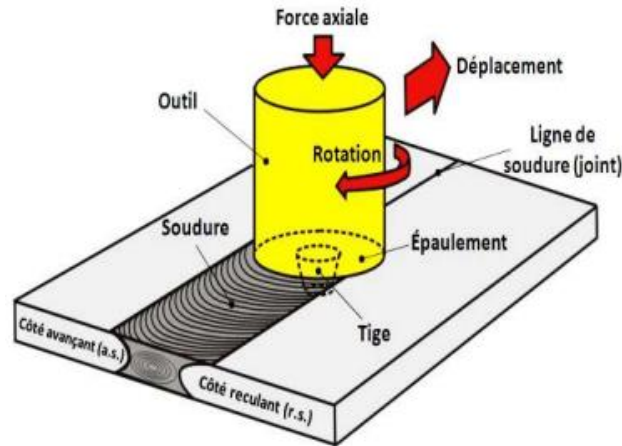


Figure I.1. Schéma technique décrivant le mécanisme de soudage par friction malaxage [43]

I.2.3. Variantes du FSW et des méthodes connexes

a. Le soudage par friction malaxage assisté électriquement (EFSW : Electric Assisted FSW):

Le EFSW, une technique novatrice dérivée du procédé de soudage par friction-malaxage (FSW), cherche à optimiser le processus de soudage en intégrant un courant électrique dans la zone de jonction [44, 45]. L'utilisation de l'électricité facilite le chauffage ciblé du matériau ainsi que son assouplissement avant d'être mécaniquement malaxé par l'outil FSW [46]. Ceci diminue la force nécessaire sur l'outil tout en permettant d'augmenter les vitesses de soudage disponibles [47, 48].

Le soudage par friction-malaxage par étincelage (EFSW) présente divers avantages par rapport au soudage par friction-malaxage (FSW) traditionnel. Ces avantages incluent un contrôle accru du processus, des vitesses de soudage augmentées d'au moins 50 %, une qualité de soudure améliorée pour certains matériaux, ainsi qu'un potentiel de soudage élargi pour des matériaux difficiles [46, 49].

Chen et ses collègues [46] ont employé la méthode de soudage bout à bout en une seule étape pour concevoir une plateforme de soudage assistée par l'électricité, comme illustré dans la Figure I.2. Cette plateforme se compose de quatre systèmes distincts : un système d'assistance électrique, un système d'isolation, un système de refroidissement et un système de protection gazeuse.

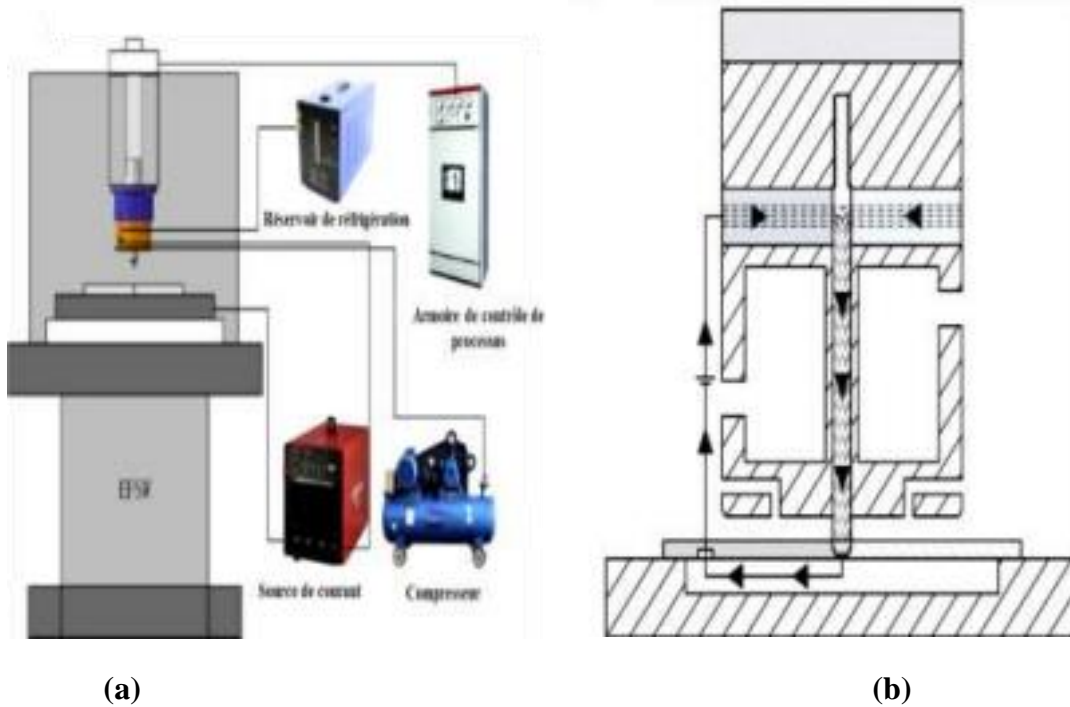


Figure I.2. Plateforme de soudage par friction malaxage assisté électriquement
 (a) Représentation schématique de l'installation complète. (b) Schéma de l'outil utilisé pour l'EFSW.

b. Soudage par friction-malaxage pulsé (PFSW : Pulsed Friction Stir Welding) :

Le soudage par friction-malaxage pulsé représente une déclinaison du procédé FSW, où des pulsations sont incorporées dans la rotation de la broche. Dans cette technique, la vitesse de rotation de l'outil est périodiquement modulée entre des niveaux élevés et des niveaux bas [50, 51]. Cette méthode peut offrir des avantages particuliers par rapport au soudage par friction-malaxage conventionnel, tels qu'une qualité de soudure supérieure, des propriétés mécaniques renforcées et une surveillance plus précise du processus [52, 53]. Les éléments essentiels à considérer sont l'intensité et la cadence des pulsations [54].

c. Soudage par friction-malaxage auto-réactif (SR-FSW : Self-Reacting Friction Stir Welding)

C'est une déviation du procédé FSW qui inclut l'utilisation de matériaux auto-réactifs durant l'opération de soudage [55]. Dans cette méthode, la rotation de l'outil induit une friction sur la surface inférieure des tôles, engendrant ainsi une force de réaction adéquate pour le soudage [56, 57]. Le soudage par friction-malaxage auto-réactif peut présenter des bénéfices comme une baisse de la température de soudage, une réduction des défauts de soudure et une amélioration des caractéristiques mécaniques de l'assemblage [58, 59].

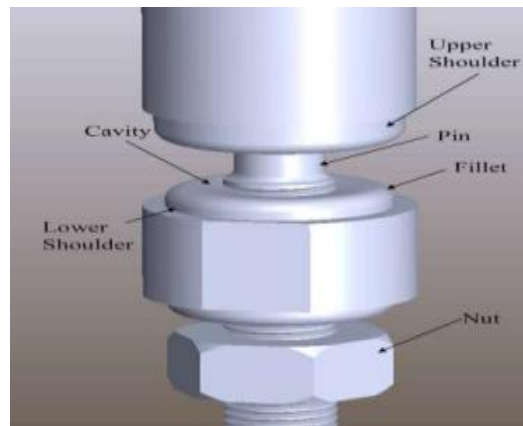


Figure I.3. Détails concernant l'outil de soudage par friction Malaxage auto-réactif

d. Le soudage par points par friction malaxage (FSSW : Friction Stir Spot Welding) :

Cette méthode découle du procédé FSW [60]. Ce procédé implique l'utilisation d'un outil rotatif qui descend à travers la surface supérieure de la tôle pour chauffer et mélanger les matériaux localement. Cela crée un point de soudure robuste sans nécessiter une fusion totale du matériau [61]. Cette technique se différencie du soudage par points classique en utilisant la friction comme principale source de chaleur [62]. Cette approche offre plusieurs avantages potentiels, tels que la diminution des déformations, l'augmentation de la productivité et l'amélioration de la qualité des joints à recouvrement. Cependant, sa mise en œuvre requiert une étude minutieuse pour ajuster les paramètres et confirmer la viabilité du procédé. Des tests expérimentaux sont essentiels avant d'envisager une application industrielle de cette méthode innovante de soudage par points [63, 64].

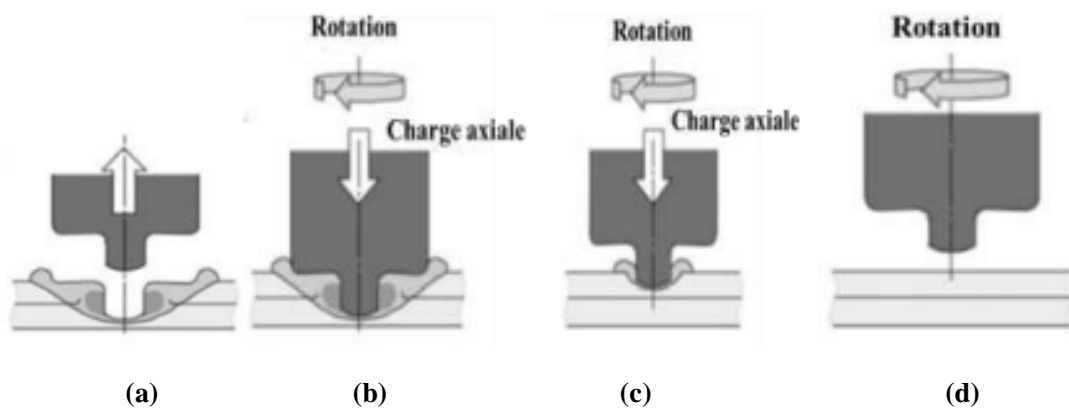


Figure I.4. Schémas du procédé conventionnel de Soudage par Points par Friction Malaxage : (a) Rotation, (b) Plongée, (c) Malaxage (temps de maintien), (d) Retrait.
[65]

I.3. Le principe de soudage par friction malaxage FSW

L'analyse thermique des diverses étapes du processus de soudage [66], La phase de plongée, de soudage et de retrait, entre autres, est souvent étudiée pour une meilleure compréhension du processus. Les thermocouples, bien qu'utiles pour suivre les variations thermiques, ne conviennent pas pour mesurer dans la zone soumise à des contraintes thermomécaniques ni pour évaluer les gradients de température sur des tôles fines. Pour pallier ces limitations, l'utilisation de caméras infrarouges est une alternative viable pour une analyse thermique plus précise [42, 65].

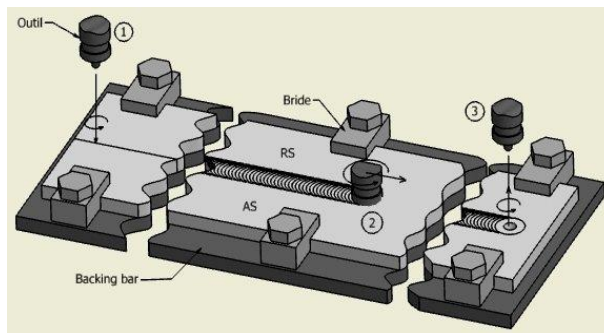


Figure I.5. Les trois phases de procédé de soudage FSW [67]

I.3.1. Phase de plongée:

Cette phase du processus de soudage, pendant laquelle l'outil entre en contact avec les pièces à souder, a fait l'objet de nombreuses recherches.

La rotation de l'outil produit une chaleur locale qui rend le matériau plus malléable, facilitant ainsi son insertion dans le joint [68]. Les études menées par de Mutukhumaran et ses collègues [69] montrent que la force transversale exercée par le matériau sur l'outil tend à se diriger vers le côté de progression. Moustafa et ses collaborateurs [70] ont démontré que la température atteint son pic dans la zone de malaxage. De plus, ils ont observé que la température maximale augmente proportionnellement à la vitesse de rotation (trois valeurs de vitesse de rotation : 344, 637 et 914 tr/min, avec une vitesse de soudage constante de 1,59 mm/s). Cette augmentation est particulièrement visible pendant la phase de pénétration (Figure I.6).

I.3.2. Phase de soudage:

La force d'appui exercée sur l'outil de soudage peut être considérablement élevée, atteignant jusqu'à 10 kN. Cette pression, associée au frottement généré par la rotation

De l'outil, induit une transition du matériau vers une consistance pâteuse, ce qui favorise le déplacement de l'outil [68].

Moustafa et ses collègues [70] ont observé que la température est négligeable pendant la phase de soudage (Figure I.22). Cependant, en dehors de cette zone de malaxage le long de la ligne de soudage, la tendance de la température reste presque constante pour les trois valeurs de vitesse de rotation. Avec ces paramètres, il est également noté que la température maximale aux points de contact entre l'outil et la pièce à souder est proche de la température de fusion du matériau (Figure I.7).

I.3.3. Phase de retrait :

Pendant la phase finale du soudage par FSW, appelée phase de retrait, l'outil est relevé de manière verticale. La décision de laisser un trou à l'extrémité de la jointure est déterminée par la technologie de l'outil employée, ce qui nécessite une prise en compte dès la conception initiale des pièces à souder [68].

De plus, selon le type d'outil utilisé, l'empreinte du pion peut persister dans le matériau, restant visible à l'endroit où le pion a été extrait [71].



Figure I.8. Trou à la fin de soudure [71]

I.4. Les différentes configurations possibles pour le soudage FSW :

Le soudage par friction-malaxage (FSW) est principalement employé pour assembler des pièces minces bout à bout. Néanmoins, ce procédé peut également être adapté à d'autres configurations de joints, telles que les soudures d'angle, en forme de "T", ou superposées [30]. La figure I.9 illustre les diverses configurations envisageables pour le soudage par FSW.

a. Bout à bout

Il s'agit d'une disposition typique dans le soudage par friction-malaxage, où deux tôles sont disposées bord à bord avec leurs arêtes rectilignes alignées [72]. L'outil de soudage se déplace le long de cette jonction droite pour former le cordon de soudure entre les deux tôles [73].

b. En coin

Dans cette configuration, les deux pièces à unir sont disposées de manière à former un angle droit entre elles. L'outil suit ensuite le contour de cette jonction angulaire, ce qui permet de créer un cordon de soudure le long de l'arête intérieure formée par les deux tôles [74].

C. En T

Union perpendiculaire de deux pièces, créant une jonction en forme de T [75]. L'outil se déplace le long de cette jonction perpendiculaire, facilitant ainsi l'assemblage des deux pièces grâce au malaxage et à la chaleur produite par friction [76].

d. Angle

Les deux pièces à unir sont positionnées avec une inclinaison spécifique entre elles [77]. L'outil suit ensuite le contour de cette jonction angulaire, ce qui permet de former un cordon de soudure le long du joint incliné formé par les deux tôles. L'angle entre les pièces peut être modifié selon les exigences de conception de la structure [78].

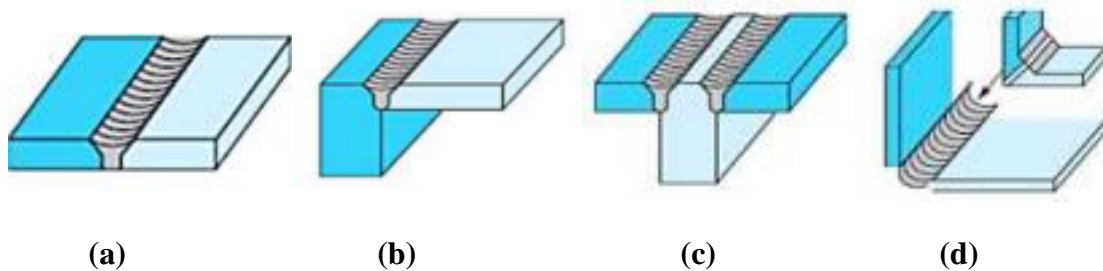


Figure I.9. Les différentes configurations de soudage effectuées par FSW : (a) bout à bout, (b) en coin, (c) en T, et (d) angle [30]

I.5. Les matériaux considérés

I.5.1. Matériaux soudables par FSW

Le soudage par friction malaxage (FSW) est une technique utilisée pour unir des matériaux qui présentent des défis lorsqu'ils sont soudés par des méthodes traditionnelles. Parmi les matériaux qui peuvent être assemblés avec succès par FSW, on trouve :

- **Alliages d'aluminium** : Le soudage par friction malaxage est largement utilisé pour l'assemblage de divers alliages d'aluminium [79, 80], En particulier, cela concerne les séries 2000, 5000, 6000 et 7000. Ces alliages d'aluminium sont largement employés dans l'industrie aéronautique et automobile en raison de leur combinaison de résistance mécanique et de légèreté [80]. Le soudage par friction malaxage offre une solution pratique pour les assembler.

· **Alliages de magnésium** : Contrairement aux méthodes de soudage par fusion, le soudage par friction malaxage (FSW) permet de souder les alliages de magnésium sans les problèmes inhérents à la fusion du métal [81]. Ainsi, de nombreux alliages à base de magnésium, tels que ceux de la série AZ31 largement utilisée, peuvent être assemblés avec succès par friction malaxage [82, 83]. Cette méthode de soudage solide évite les défauts de solidification ainsi que les risques de fissuration ou de porosité souvent rencontrés lors de la fusion du magnésium.

· **Alliages de cuivre** : Le soudage par friction malaxage (FSW) représente une alternative remarquable au soudage par fusion pour les alliages de cuivre [84]. En effet, le FSW permet d'éviter la porosité souvent observée lors du soudage des alliages de cuivre par les méthodes conventionnelles impliquant la fusion. Cet avantage est particulièrement bénéfique pour l'assemblage des laitons et des bronzes, deux familles d'alliages de cuivre largement utilisées dans l'industrie [85].

· **Alliages de titane**: En raison de leur difficulté à être soudés par des méthodes conventionnelles [86], ces matériaux conviennent parfaitement au soudage par friction malaxage. C'est notamment le cas du TA6V, largement utilisé dans l'industrie aérospatiale [87].

· **Aciers doux et inoxydables**: Bien que le soudage par friction malaxage des aciers soit complexe en raison de leur haute température de fusion, il reste envisageable avec l'utilisation d'outils appropriés [88, 89].

· **Matériaux composites** : Le soudage par friction malaxage est aussi employé pour les matériaux composites, notamment les composites à matrice métallique (CMM) et les composites à matrice polymère (CMP) [90].

· **Matériaux spéciaux** : Le soudage par friction malaxage peut être ajusté pour convenir à d'autres matériaux spéciaux ou métaux réfractaires, selon les conditions de soudage particulières.

· **Les polymères** : Les polymères peuvent être classés en différentes catégories en fonction de leur structure, de leurs propriétés et de leurs applications. Par exemple, les plastiques sont des polymères synthétiques couramment utilisés, tandis que les polymères naturels, comme la cellulose et la soie, sont présents dans la nature. et parmi ces polymères nous citons les suivant : **PP, PC, PEHD** C'est que nous avons utilisé dans cette mémoire

I.5.2. Possibilité d'assemblages hétérogènes:

Cette méthode d'assemblage offre la possibilité de souder des matériaux hétérogènes, incluant des alliages d'aluminium avec d'autres métaux tels que

l'acier [91], le titane ou le magnésium [92], sans nécessiter une fusion totale du matériau [93-96].

I.6. Structure générale des assemblages obtenus par FSW (la microstructure)

Le soudage par friction-malaxage produit un joint soudé caractérisé par trois zones distinctes en plus du matériau de base [97]. Ces régions sont représentées sur la Figure I.10.

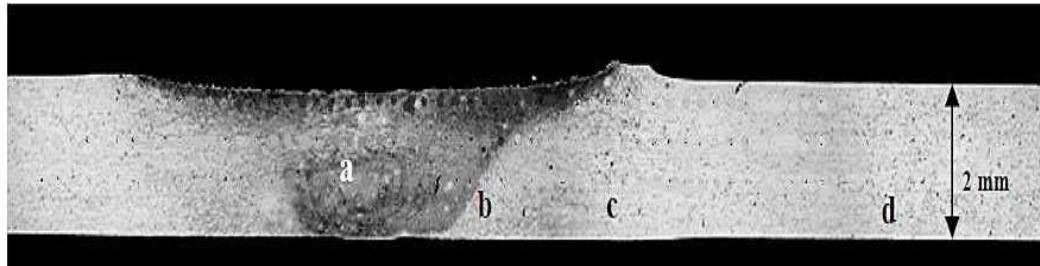


Figure I.10. Vue en coupe transversale du joint soudé: a) Noyau ; b) Zone affectée thermo mécaniquement (ZATM) ; c) Zone affectée thermiquement (ZAT) et d) Matériau de base.

Au cours du processus de soudage par friction, le matériau formant le joint de soudure subit des fluctuations de température, provoquant des changements de phase et des modifications de sa microstructure une fois refroidi [98].

I.6.1. La zone affectée thermiquement (ZAT ; HAZ : Heat Affected Zone)

La zone affectée thermiquement (zone c) subit une augmentation de température pendant le processus de soudage par FSW, comme son nom l'indique. Cette élévation de température n'altère ni la taille ni la forme des grains initialement présents [99].

Les modifications constatées dans cette zone sont très comparables à celles observées dans les zones affectées thermiquement lors de méthodes de soudage conventionnelles [6].

Cette région est généralement identifiée comme la zone de rupture dans la majorité des tests de traction d'un cordon FSW effectué avec un alliage d'aluminium [100].

I.6.2. La zone affectée thermo mécaniquement (ZATM; TMAZ Thermo Mechanically Affected Zone)

En ce qui concerne la zone b : Pendant son déplacement le long des deux plaques, le pion altère la structure des grains du matériau de base, entraînant ainsi une désorientation géométrique des grains par rapport à leur orientation initiale dans la ZATM [101].

Cette zone se distingue par les déformations plastiques engendrées par le mouvement de l'outil [6]. La frontière entre le noyau soudé et la ZATM est plus distincte du côté advancing side que du côté retreating side [101].

I.6.3. Le noyau soudé (nugget)

La zone c subit les déformations plastiques les plus significatives et atteint des températures maximales. À ces températures, les précipités existants peuvent se dissoudre, tandis que les intermétalliques subissent un broyage et une dispersion importants en raison de la forte déformation plastique. Cette région se trouve au centre de la soudure ainsi que dans la partie supérieure de la zone d'attaque [6].

I.7. Paramètres du soudage FSW

I.7.1. Paramètres du procédé

Pendant le processus de soudage, plusieurs paramètres essentiels, tels que la vitesse de rotation de l'outil (exprimée en tr/min), la vitesse d'avance le long du joint (mesurée en mm/min), l'angle de l'outil et la pression d'application, influent sur la quantité de chaleur transférée, le degré de mélange des matériaux et la configuration de l'écoulement.

Ces variables thermomécaniques ont un impact significatif non seulement sur l'apparence du joint, mais aussi sur sa microstructure et, par extension, sur ses propriétés mécaniques [97].

I.7.1.1. La vitesse de rotation de l'outil

Choisir la bonne vitesse de rotation est crucial pour réussir un soudage. Une rotation trop rapide peut surchauffer la pièce, entraînant des bavures, tandis qu'une rotation trop lente peut ne pas chauffer suffisamment les pièces, entravant le malaxage et entraînant des cavités dans la soudure [102]. Selon Lorrain, une augmentation de la vitesse de rotation augmente la température maximale et élargit les cycles thermiques ainsi que les joints [103].

Serier et al. (2019) ont fondé leurs recherches sur la méthode des plans d'expériences pour prédire la qualité du cordon de soudure en termes de résistance à la traction. L'analyse des résultats révèle que la résistance à la traction optimale est obtenue lorsque la vitesse de rotation de l'outil est à son niveau le plus bas (Figure I.11), tandis que les deux autres facteurs (vitesse de soudage et force axiale) conduisent à une meilleure résistance à la traction lorsqu'ils sont réglés à leur niveau le plus élevé. Ainsi, il est conclu que la force axiale a une influence plus significative que la vitesse d'avancement [9].

Serier et al. (2019) démontrent que le phénomène de retour élastique est réduit lorsque la soudure est réalisée à une vitesse de rotation élevée de l'outil [10].

I.7.1.2. La vitesse d'avance

La sélection de la vitesse d'avance lors du soudage doit être adaptée aux propriétés du matériau de base afin d'éviter d'endommager l'outil. Les effets de ce paramètre ont été récemment explorés en profondeur. Selon Liu et al. [104], une augmentation de la vitesse d'avance renforce la résistance mécanique et favorise la déformation à la rupture. Les recherches menées par Cavaliere et al. [105] révèlent une réduction de la taille des grains dans la zone centrale de la soudure avec l'augmentation de la vitesse d'avance, jusqu'à ce qu'un plateau soit atteint. D'autres études mettent en évidence l'impact prépondérant de la vitesse d'avance sur la microstructure du joint par rapport à la vitesse de rotation [97, 106, 107]. Il a été observé que la vitesse d'avance a une influence plus significative sur la microstructure du joint que la vitesse de rotation, entraînant une diminution de la zone affectée thermiquement et une augmentation de la dureté à des vitesses plus élevées. Cette observation est confirmée par les travaux de Reynolds, Tang et al. [108], qui affirment que la vitesse d'avance est un facteur clé dans la régulation des températures de chauffage et de refroidissement, influençant ainsi la durée d'exposition thermique du matériau.

Le choix optimal de l'angle dépend de la configuration spécifique de l'épaulement et des propriétés rhéologiques du matériau soumis à la soudure [97]. Selon les conclusions de Serier et al. [9], une vitesse de soudage élevée contribue également à une meilleure qualité de joint de soudure, tout en minimisant le phénomène de retour élastique.

Vivekanandan et al. [109] démontrent que la résistance à la traction atteint son maximum pour des vitesses de soudage allant jusqu'à 60 mm/min, puis diminue légèrement aux vitesses de 40 mm/min et 90 mm/min, selon les résultats des essais de résistance à la traction. Leurs tests de dureté ont également révélé que la valeur de dureté la plus élevée, mesurée à 91 HV au centre de la soudure (à une vitesse de soudage de 60 mm/min), présente des valeurs de dureté plus faibles à d'autres vitesses de soudage, en particulier sur le côté gauche de l'AA 6035. Les valeurs de dureté élevées le long de la ligne centrale se rapprochent de celles du matériau de base de l'AA6035.

I.7.1.3. La force de forgeage

La force axiale, qui est nécessaire pour maintenir l'outil dans une position verticale appropriée, joue un rôle crucial, surtout lors du pilotage en force. Cette force a un impact direct sur le choix des vitesses d'avance et de rotation [102]. Lorsque les soudures sont effectuées avec un contrôle de la charge, la force verticale devient un paramètre de soudage essentiel. Yan et al. [68] ont examiné les effets d'une variation

de cette force et ont constaté qu'il existe une plage de force qui permet d'obtenir un joint sans défauts, et que les caractéristiques du joint restent relativement stables dans cette plage de force.

D'après l'étude menée par Kim et al. [110], il a été constaté que la taille de la fenêtre de fonctionnement en soudage augmente en fonction de l'intensité de la force appliquée, comme le montre la Figure I.13.

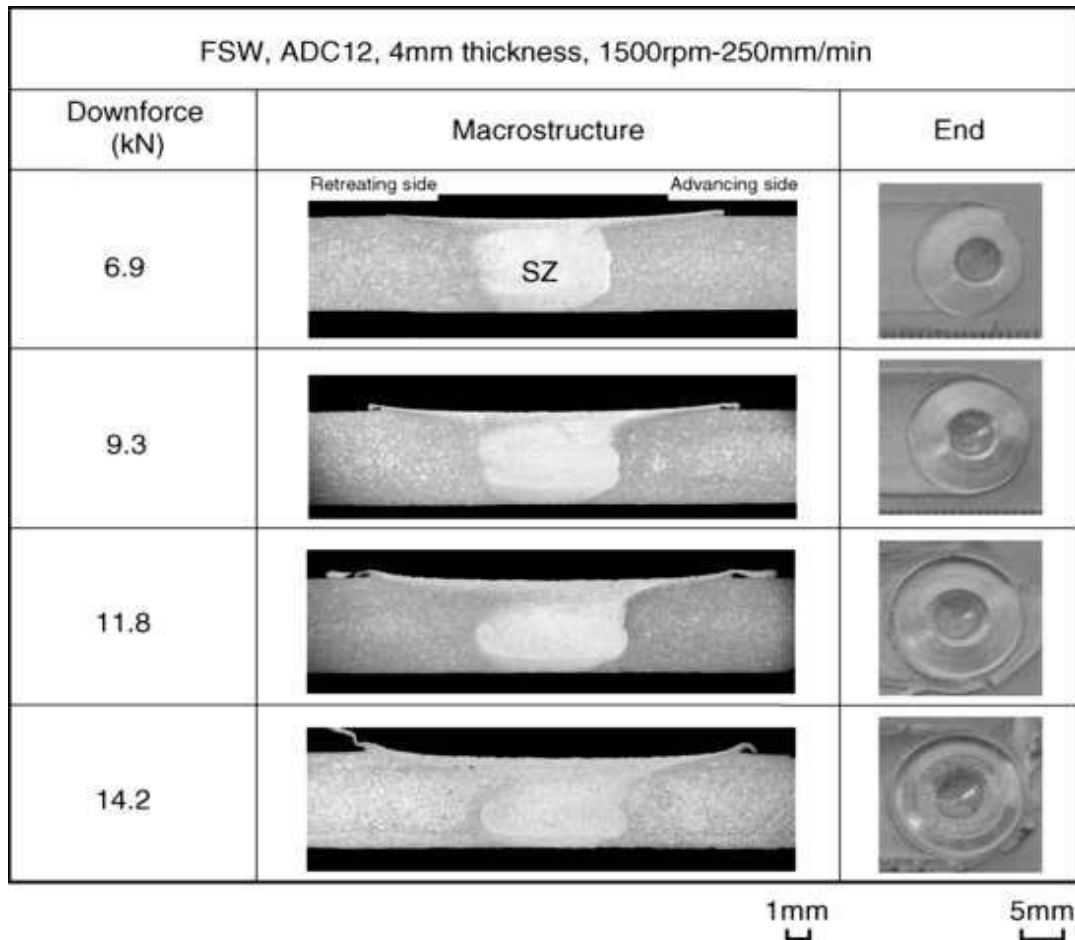


Figure I.13. Effet de la force de plongée de l'outil sur la formation du joint. [110]

D'après Serier et al. [9], La force axiale est presque sans effet puisque le passage de son bas Niveau à son haut niveau ne donne pas un changement considérable sur le retour élastique.

I.7.1.4. L'angle d'inclinaison de l'outil

Il est essentiel de régler l'angle de l'outil, habituellement situé entre 0° et 5°, afin d'optimiser la répartition de la matière autour du pion de soudage. Cet ajustement est également crucial pour corriger l'angle de l'outil, qui peut être altéré par la résistance des pièces pendant le processus de soudage.

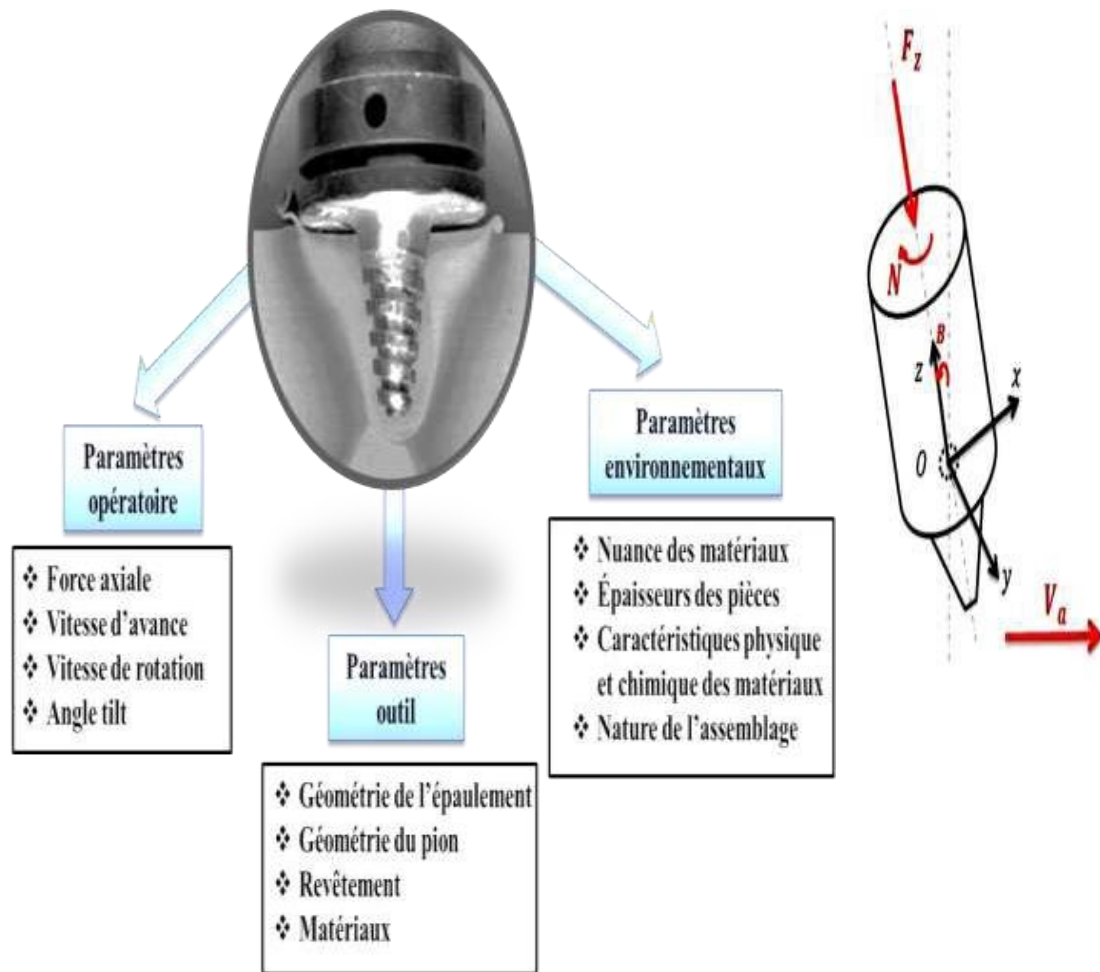


Figure I.14. Les paramètres du procédé FSW

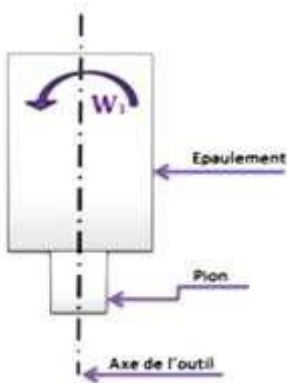
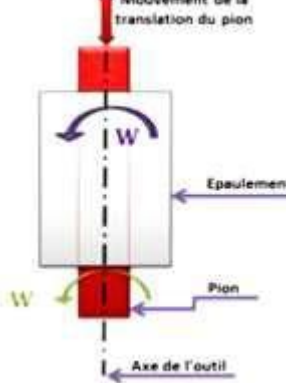
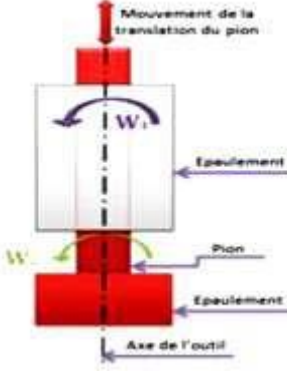
I.7.2. Paramètres outils



Figure I.15. Les technologies d'outils existants (a) Outil conventionnel, (b) Outil à pion rétractable et (c) Outil à deux épaulements et un pion ajustable verticalement.

Particularité de ses technologies

Tableau I.1. Les technologies d'outils existants

Outil conventionnel	Outil à pion rétractable	Outil à deux épaulements et un pion ajustable
		
<ul style="list-style-type: none"> • 1 pion solidaire de l'épaulement • 1 épaulement • 1 axe outil 	<ul style="list-style-type: none"> • 1 pion ajustable • 1 épaulement • 2 axes outils 	<ul style="list-style-type: none"> • 1 pion ajustable • 2 épaulements • 2 axes outils
<ul style="list-style-type: none"> • C'est l'outil le plus utilisé • Nécessite juste l'accès à la surface supérieure • Nécessite une enclume à l'envers 	<ul style="list-style-type: none"> • Soudage des pièces avec épaisseurs variables • Nécessite juste l'accès à la surface supérieure • Pas de trou à l'extrémité : car avec cet outil, le pion rentre progressivement dans l'épaulement supérieur à la fin du soudage • Contrôle du pion et de l'épaulement de manière distincte 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas d'enclume • Limite les efforts créés par la machine utilisée pour effectuer FSW • Nécessite l'accès aux deux surfaces des pièces à souder • Contrôle du pion et de l'épaulement de manière distincte

En résumé, la configuration de l'outil joue un rôle essentiel dans la gestion du mouvement du matériau lors du processus de soudage, et l'impact des forces axiales sur l'outil est également important. De Backer note que l'utilisation d'un pion fileté nécessite une force axiale plus importante en soudage par friction-agitation (FSW) que celle requise avec un pion lisse [111]. Les éléments clés à considérer sont les suivants:

- Conception du pion.
- Forme de l'épaulement.
- Types de matériaux utilisés.

a. Paramètres associés à l'environnement du procédé

- Épaisseur des pièces à assembler.
- Variations de température durant le soudage.
- Nuance des matériaux employés.
- Nature de l'assemblage (utilisation de matériaux identiques ou différents).
- Propriétés chimiques et physiques des matériaux, comme leur conductivité et capacité thermiques.

Il est crucial de choisir correctement les paramètres de soudage en fonction des matériaux, de l'épaisseur des pièces et de la géométrie de l'outil. Ces décisions ont un impact direct sur l'apport énergétique, la circulation de la matière, la qualité du cordon, ainsi que sur les propriétés mécaniques et les contraintes mécaniques engendrées dans l'assemblage [31].

Un mauvais réglage de ces paramètres peut entraîner des défauts tels que des porosités, des criques de refroidissement et des bavures. De nombreuses études ont été menées pour déterminer la relation entre ces paramètres et leur incidence sur les propriétés mécaniques et métallurgiques du joint [6].

I.8. Avantage et inconvénients du FSW

I.8.1. Avantages

I.8.1.1. Avantages liés au procédé

- Large Capacité à souder une large gamme d'épaisseurs de matériau.
- La préparation simple des surfaces par usinage mécanique, éliminant le besoin

De décapage chimique pour les alliages légers.

- Réalisation des soudures en une seule passe sur des épaisseurs standard, ou en deux passes opposées pour les épaisseurs importantes.
- La possibilité de joindre des matériaux différents, offrant une grande flexibilité.
- L'absence de travaux de finition requis après le soudage, économisant du temps et des ressources.
- Caractéristique de ne pas nécessiter d'apport de matière additionnelle pour la soudure.
- L'autonomie du procédé en tant que source d'énergie.
- Flexibilité de soudage dans diverses orientations.

I.8.1.2. Avantages liés à la soudure par FSW

- Capacité à souder un large éventail de matériaux, y compris ceux qui sont difficiles à souder par des méthodes classiques.
- Possibilité de réaliser des soudures homogènes ou hétérogènes sur des alliages complexes.
- Procédé de soudage à l'état solide, évitant les défauts associés à la solidification tels que la porosité ou la fissuration à chaud.
- Joints soudés de haute qualité avec des caractéristiques mécaniques souvent supérieures à celles obtenues par les techniques de soudage par fusion traditionnelles.
- Excellentes propriétés mécaniques des joints, assurant solidité et durabilité.
- Minimisation des contraintes résiduelles, réduisant le risque de déformation ou d'endommagement post-soudage.
- Faible distorsion des pièces soudées, garantissant une meilleure intégrité structurelle

I.8.1.3. Avantages liés à l'équipement utilisé

- Facilité d'automatisation du procédé grâce à un contrôle précis par commande numérique, augmentant l'efficacité et la reproductibilité.
- Conception simple de l'équipement électromécanique, similaire à une machine- outil standard, ce qui simplifie la maintenance et l'opération.
- Absence de nécessité de protection thermique supplémentaire, réduisant ainsi les coûts et la complexité opérationnelle.
- Consommables limités principalement à l'outil de soudage lui-même et à l'énergie électrique, rendant le processus plus économique.
- Possibilité de contrôler et d'ajuster les paramètres en temps réel pendant le soudage, assurant une qualité constante et une adaptabilité aux conditions de soudage.

I.8.2. Inconvénient

Malgré ses avantages, le FSW présente plusieurs contraintes techniques, notamment la nécessité d'appliquer des forces verticales importantes pour former le joint, l'utilisation d'installations volumineuses, le besoin de supports pour contrer les forces latérales, le bridage rigide des pièces, la formation de cratères en fin de soudure, ainsi que des vitesses de soudage modérées. De plus, le procédé FSW est susceptible de présenter un défaut de racine, qui se manifeste par une pénétration inadéquate de l'outil de soudage. Ce défaut survient lorsque l'outil de soudage ne pénètre pas suffisamment, entraînant un manque d'adhérence à la racine du joint. La détection de ce défaut pendant le processus de soudage est difficile, et les inspections destructives sont souvent les seules méthodes fiables pour l'identifier [34].

I.9. Les domaines d'applications

I.9.1. Domaine automobile

En 2013, Mercedes a commencé à utiliser le procédé FSW pour l'assemblage des pièces du plancher de sa SL-Class. De son côté, Mazda a opté pour cette technique afin de souder des composants de la suspension, ainsi que les capots et les portes de ses véhicules, entraînant ainsi une réduction significative des coûts d'équipement, atteignant environ 40% [68]. L'Audi R8 illustre également l'application du soudage par friction-malaxage, avec la fusion de feuilles d'aluminium de différentes épaisseurs. Honda a également expérimenté le procédé FSW pour unir des pièces en acier et en aluminium, matériaux distincts. De plus, cette méthode a été utilisée dans le soudage de fonds bombés destinés à des camions-citernes [68]. Une analyse approfondie du soudage FSW est réalisée sous deux angles : expérimental et numérique.

L'étude se focalise sur l'analyse de la structure microscopique et la modélisation des interactions thermomécaniques éphémères entre l'outil de soudage et le matériau [67].

I.9.2. Domaine ferroviaire

Les fabricants de trains européens ont mis en œuvre cette méthode pour les toits des tramways à Munich, tandis qu'au Japon, elle a été adoptée dans la production des trains Hitachi [68].

I.9.3. Domaine aéronautique

Dans le domaine de l'aviation, Boeing a recouru au FSW pour assembler divers composants, incluant le soudage de raidisseurs, et a également utilisé cette méthode pour fabriquer les panneaux de l'Eclipse 500 [68]. De son côté, le géant de l'aérospatiale Airbus a fait preuve d'innovation en adoptant le soudage par friction-malaxage pour ses

gros avions civils, une première dans le secteur. Ce procédé de soudage est considéré comme une alternative plus avantageuse au rivetage classique, offrant une multitude de possibilités d'application [112].

I.9.4. Domaine spatial

Pour la construction des fusées Boeing, des techniques de soudage circonférentiel et longitudinal ont été utilisées pour les réservoirs d'oxygène liquide. Ces mêmes méthodes ont également été employées pour souder les panneaux incurvés du réservoir d'hydrogène liquide de la constellation Ares I de la NASA [68].

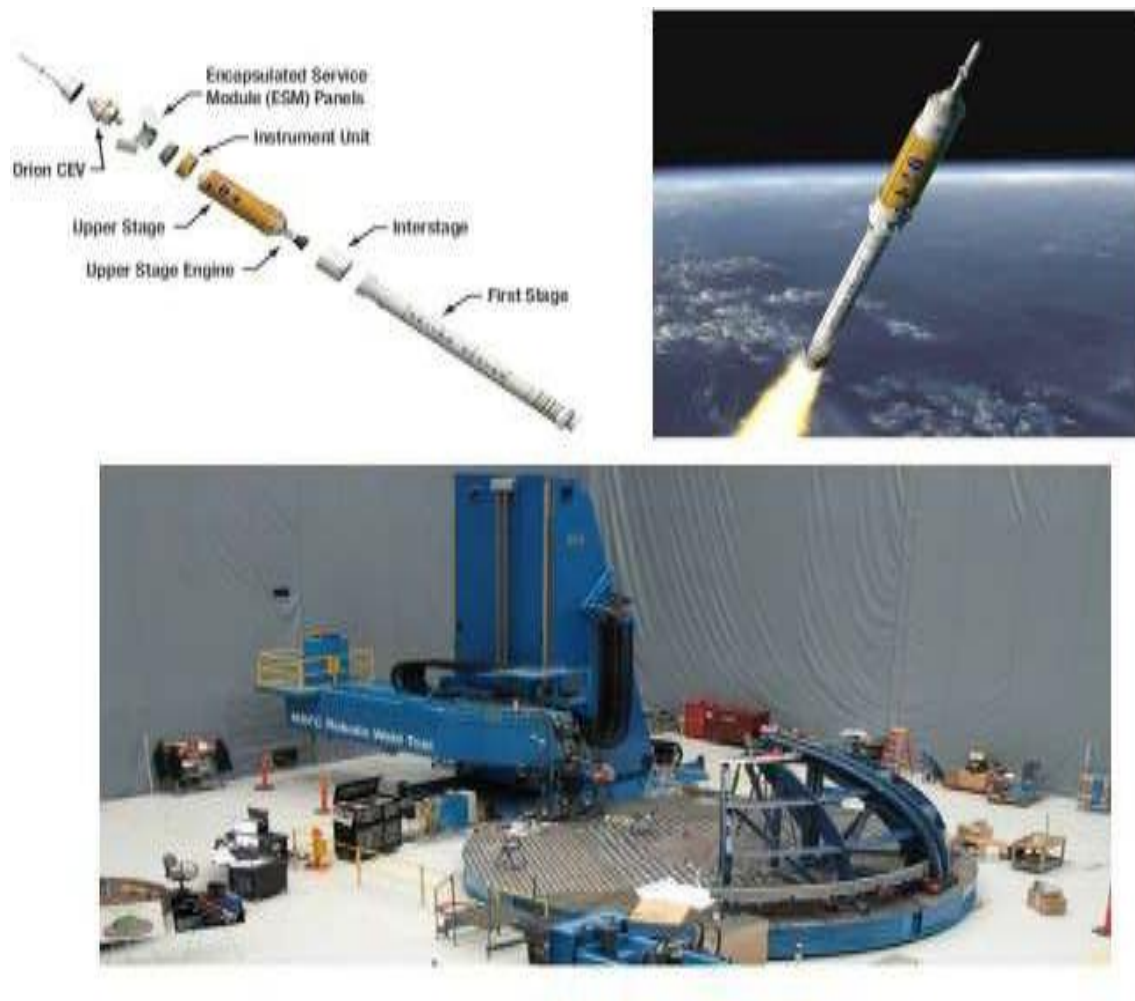


Figure I.16. Ares I

I.9.5. Autres domaines d'application

Le soudage est utilisé pour assembler des supports de lumières (voir Figure I.25. (a)), pour relier des tôles en CU-OF dans le secteur du génie électrique (voir Figure I.25. (b)), et également pour la fabrication d'éléments générateurs, comme indiqué dans la Figure I.25. (c) [68].

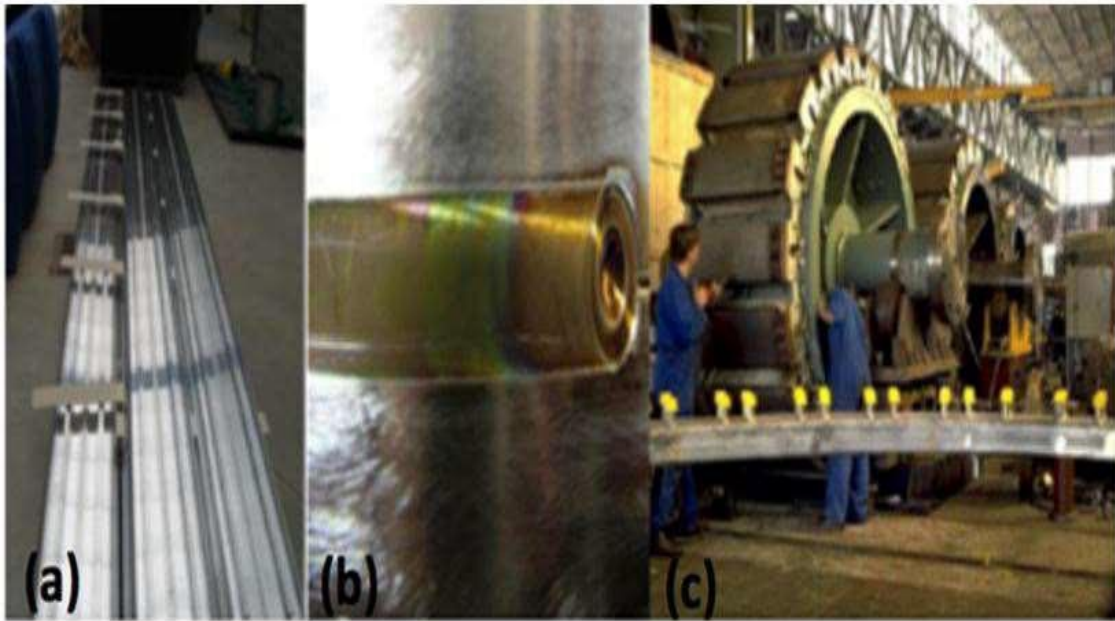


Figure I.17. (a) : Des supports de lumières, (b) : Des tôles en CU-OFF, (c) Des éléments de générations

I.10. Conclusion

Dans les premiers stades de cette thèse, une attention particulière a été accordée à plusieurs sujets explorés à la fois dans la recherche académique et les expérimentations pratiques, visant à approfondir la compréhension des phénomènes physiques liés au soudage par friction-malaxage (FSW).

Nous avons souligné les défis impliqués dans l'adaptation de ces modèles pour modéliser le processus de soudage FSW.

D'après notre revue de la littérature, il semble que la déformation ait tendance à se concentrer autour des zones affectées thermo-mécaniquement (ZATM) dans la plupart des cas.

Chapitre II

II.1.Introduction

Le polyéthylène haute densité (PEHD), ou HDPE (High-Density Polyethylene), est un polymère thermoplastique largement utilisé et reconnu pour ses propriétés exceptionnelles. Depuis son développement dans les années 1950, le PEHD est devenu un matériau de choix dans de nombreux secteurs grâce à sa résistance, sa durabilité et sa polyvalence.

Le PEHD se caractérise par une structure moléculaire linéaire avec peu de ramifications, ce qui lui confère une densité élevée et une rigidité accrue par rapport à d'autres types de polyéthylène, tels que le polyéthylène basse densité (PEBD). Cette structure unique lui permet de résister aux impacts, à l'abrasion et aux produits chimiques, tout en offrant une faible perméabilité à l'humidité et aux gaz.

Utilisé dans une variété d'applications, le PEHD se retrouve dans les emballages alimentaires, les tuyaux et conduites, les matériaux de construction, et de nombreux produits de consommation courante. Sa capacité à être recyclé en fait également un matériau plus respectueux de l'environnement par rapport à d'autres plastiques, bien que la gestion des déchets plastiques demeure un défi majeur.

En somme, le PEHD est un polymère essentiel dont les caractéristiques et les applications variées en font un matériau incontournable dans notre vie quotidienne et industrielle. Cependant, l'importance de poursuivre les efforts en matière de recyclage et de développement de solutions durables ne peut être sous-estimée pour minimiser son impact environnemental.

II.2. Définition polyéthylène

Le polyéthylène présente une importance majeure puisque sa production mondiale annuelle dépasse 10 millions de tonnes.

Le polyéthylène est un matériau thermoplastique de la famille de polyoléfines contenant uniquement des carbones hybridés de types sp^3 .

Sa molécule se présente sous forme de chaînes contenant 1000 à 2000 monomères. Partiellement cristallin, le polyéthylène contient deux phases:

- Une zone amorphe dans laquelle les chaînes sont disposées de manière désordonnée.
- Une zone cristalline dans laquelle les chaînes est disposée de manière ordonnée ; formant ainsi des cristallites. Les chaînes dans les zones cristallines se regroupent sous forme de lamelles (fibrilles lamellaires) de quelques entrainés d'Angströms. Ces lamelles sont Typiquement arrangées comme des sphérolites. [126]

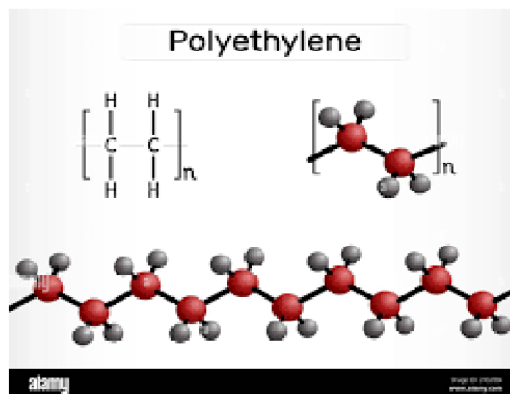


Figure. II.1 : Molécule polyéthylène

II.3. Classification de polyéthylène

Les polyéthylènes peuvent être :

-linéaires ou branchés (ou ramifiés), et dès lors classés selon :

-leur densité qui dépend du nombre et de la longueur des ramifications présentes sur les chaînes moléculaires,

-leur masse molaire :

-polyéthylène à masse molaire très basse (ULMWPE ou PE-WAX, *ultra low molecular weight polyethylene*),

-polyéthylène à masse molaire élevée (HMWPE, *high molecular weight polyethylene*).

-PE-UHPM, polyéthylène de masse molaire très élevée (UHMWPE, *ultra-high-molecular-weight polyethylene* ou PE-UHMW selon la norme EN ISO 1043-1) ;

*réticulés : les polyéthylènes réticulés (PE-R, dits aussi PEX ou XLPE, pour *cross-linked polyethylene*) sont presque tous faits à partir de polyéthylène à haute densité (HDPE), on les désigne alors :

-PE-RHD, polyéthylène réticulé à haute densité (HDXLPE, *high density cross-linked polyethylene*).

Tableau II.1 : différents types de polyéthylène

Nom	Sigle en français	Sigle en anglais	Abréviation selon la norme EN ISO 1043-1	Synthèse	Branchements	Masse volumique (g/cm ³)
Polyéthylène à très basse densité	PE-TBD	VLDPE, <i>very low density polyethylene</i>	PE-VLD	Catalyse de Ziegler-Natta à basse pression (< 10 bar) et catalyse métallo cènes (mPE-TBD)		
Polyéthylène à basse densité linéaire	PE-BDL	LLDPE, <i>linear low-density polyethylene</i>	PE-LLD	Copolymérisation avec des oléfines par catalyse de Ziegler-Natta à basse pression (< 10 bar)	Courts	
Polyéthylène basse densité	PE-BD	LDPE, <i>low-density polyethylene</i>	PE-LD	Polymérisation radicalaire sous	Longs et courts	0,910 - 0,925

				très haute pression	irrégulièrement distribués	
Polyéthylène moyenne densité	PE-MD	MDPE, <i>medium-density polyethylene</i>	PE-MD	Catalyseur Phillips		0,926 - 0,940
Polyéthylène haute densité	PE-HD	HDPE, <i>high-density polyethylene</i>	PE-HD	Catalyse de Ziegler-Natta et catalyse métallo- cène (mPE-HD)		

II.4. Définition polyéthylène haute densité (PEHD)

Le polyéthylène haute densité (PEHD) est un polymère thermoplastique fabriqué à partir du pétrole. Il est connu pour sa durabilité et sa résistance aux chocs, aux produits chimiques et aux intempéries, ce qui en fait un matériau idéal pour une large gamme de produits. Applications Le PEHD est produit par polymérisation de l'éthylène et a un poids moléculaire élevé, ce qui contribue à sa densité et à sa rigidité élevées.

II.5. Recyclage Du PEHD

Le PEHD est un matériau hautement recyclable et peut être utilisé pour fabriquer de nouveaux produits plusieurs fois sans perdre ses propriétés d'origine. Le recyclage Le processus de recyclage du PEHD implique la collecte, le tri et la transformation du matériau en une matière propre et dense qui peut être fondue et moulée dans de nouveaux produits. Le PEHD peut être recyclé en une large gamme de produits, notamment :

- Tuyaux
- Bois d'œuvre
- Câbles
- Récipients et emballages en plastique
- Biens de consommation, tels que les jouets et les meubles de jardin

Le recyclage du PEHD contribue à réduire la quantité de déchets qui finissent dans les décharges, à préserver les ressources et à réduire la demande de matières premières à base de pétrole. Le recyclage du PEHD contribue également à réduire les émissions de gaz à effet de serre, car il faut moins d'énergie pour fabriquer des produits à partir de PEHD recyclé qu'à partir de PEHD vierge.

Pour s'assurer que le PEHD est correctement recyclé, il est important de le séparer des autres plastiques et de veiller à ce qu'il soit débarrassé de tout contaminant avant d'être traité. Cela permet de s'assurer que le PEHD recyclé est de haute qualité et qu'il peut être utilisé pour fabriquer de nouveaux produits de manière efficace.



Figure II.2 : le label PEHD

II.6. Fabrication

II.6.1 Historique

Le polyéthylène haut densité est obtenu par des procédés de polymérisation de l'éthylène à basse pression, seul ou avec des Co monomères. Les premières unités de production datent du milieu des années cinquante. La première fut construite en 1955 par la société Phillips au Texas. Ce fut ensuite Hoechst qui démarra la première unité selon le procédé Ziegler en 1956. Dans les années soixante, des améliorations furent apportées au procédé Ziegler par l'utilisation de catalyseurs superactifs permettant de supprimer la coûteuse opération d'élimination des résidus catalytiques. Les développements les plus récents proviennent des procédés de polymérisation en phase gazeuse : BASF construisit sa première unité en 1964 ; Union Carbide a définitivement amélioré le procédé en phase gazeuse et l'a industrialisé dans les années quatre-vingt et, aujourd'hui, de nombreux licenciés utilisent cette technologie. D'autres procédés en phase gazeuse ont été développés et améliorés par la suite [127]

II.6.2 Procédés de polymérisation

II.6.2.1. Le procédé Standard Oil (procédé Zletz), basé sur l'emploi d'un catalyseur à l'oxyde de molybdène, est maintenant, à notre connaissance, totalement abandonné.

II.6.2.2. Le procédé Phillips est basé sur l'emploi d'un catalyseur à l'oxyde de chrome hexa valent (CrO_3) sur un support de silice et/ou d'alumine. Le premier procédé Phillips consistait en une polymérisation en solution dans le cyclohexane. Il a été largement supplanté par le procédé particle-form beaucoup plus économique en énergie, dans lequel la réaction s'effectue en suspension dans un hydrocarbure liquide, généralement l'isobutane. La température du milieu, qui est de l'ordre de $100\text{ }^\circ\text{C}$, règle la masse molaire du polymère, la pression devant être suffisante ($\approx 3\text{ MPA}$) pour que le milieu reste liquide.

II.6.2.3. Le procédé Ziegler est fondé sur l'emploi d'un catalyseur à base de tétrachlorure de titane associé à un composé organométallique : un chlorure d'alkyl aluminium. Les premières unités de polymérisation en solution ont peu à peu laissé la place à d'autres fonctionnant en suspension dans un hydrocarbure du type hexane. Les températures de réaction sont généralement légèrement inférieures à $100\text{ }^\circ\text{C}$ et la pression est de quelques méga pascals. Le degré de copolymérisation dépend des proportions relatives d'éthylène et de Co monomère dans le milieu réactionnel. La masse molaire est contrôlée par un agent de transfert qui est l'hydrogène.

II.6.2.4. Les récents procédés en phase gazeuse et à lit fluidisé, basés sur des catalyseurs Phillips ou Ziegler, sont les plus intéressants car, d'une part, ils ne nécessitent plus l'emploi de grandes quantités de solvant et, d'autre part, la capacité des réacteurs est beaucoup plus importante. En outre, ils permettent d'obtenir dans le même réacteur les autres polyéthylènes linéaires moyenne densité et basse densité. Le procédé Uni Pol d'Union Carbide repose sur un catalyseur au chrome et la capacité des réacteurs atteint 200 kt par an. La taille des installations de polymérisation en phase gazeuse en lit fluidisé est limitée par l'évacuation de la chaleur de réaction. L'amélioration des techniques d'échange thermique (procédé « super condensé » d'Exxon Chemicals, procédé « haute productivité » de BP Chemicals) va permettre d'augmenter encore la taille des installations avec des investissements limités. [127]

II.7. Méthodes de contrôle

Les paramètres structuraux des polyéthylènes hauts densité sont mesurés par des techniques de laboratoire plus ou moins sophistiquées.

II.7. 1.Cristallinité

Le taux de cristallinité peut être mesuré par analyse thermique différentielle, diffraction des rayons X, spectroscopie infrarouge. Les contrôles de routine porteront essentiellement sur la mesure de la masse volumique standard (MVS). L'échantillon est une pastille de polyéthylène moulée dans des conditions rigoureuses de pression (510 N/cm²), de température et de programme de refroidissement (14 °C/min). La mesure est faite à l'aide d'une balance hydrostatique selon la norme ISO 1183.

II.7. 2.Masse molaire

La masse molaire peut être mesurée par chromatographie d'exclusion stérique (ancienne GPC) ou par détermination de la viscosité intrinsèque en solution. Dans la pratique, la masse molaire moyenne est estimée d'après l'indice de fluidité à chaud ou MFR (Mass Flow Rate) anciennement, en anglais : Melt-Index (MI). La mesure consiste à déterminer la masse de polyéthylène fondu qui s'écoule pendant 10 min à 190 °C à travers une filière normalisée sous l'action d'un piston lesté d'une masse. L'indice de fluidité selon la norme ISO 1133 est mesuré sous une charge :

- de 2,16 kg pour les résines de faible masse molaire ;
- de 5 kg pour les résines de masse molaire moyenne ;
- de 21,6 kg pour les résines de masse molaire élevée. Une valeur indicative de la largeur de la distribution des masses molaires (permettant de comparer différents grades) peut être donnée par le rapport FRR (Flow Rate Ratio) ou par des mesures rhéologiques [4] :

II.8. Principales propriétés du PEHD

II.8.1.Propriétés mécanique

II.8.1.1.Rigidité

La rigidité d'une pièce en PEHD est d'autant plus élevée que la cristallinité du polymère est importante. Du fait que, l'augmentation de la masse molaire s'accompagne d'une baisse de la cristallinité 'K', la rigidité décroît quand la masse molaire augmente. [126]

II.8.1.2.Comportement au choc

La résistance au choc varie en sens inverse de la rigidité. La résistance au choc d'une pièce en PEHD est d'autant meilleure que :

- sa masse molaire est plus importante (mais sa transformation est plus difficile),
- la température est plus élevée (mais la rigidité décroît fortement avec la température),
- la distribution des masses molaires est plus étroite (pour les pièces injectées. [126])

II.8.2.Propriétés physiques

La différence entre le PEHD et le PEBD est le point de ramollissement, puisqu'il se situe au-dessus du point d'ébullition de l'eau pour l'un et au-dessous pour l'autre. Les articles fabriqués, avec le polyéthylène de haute densité, peuvent ainsi être stérilisés à la vapeur. [126]

II.8.3.Propriétés thermiques

La température de fusion du PEHD est comprise entre 125 et 135°C. Sa température de transition vitreuse (Tg) est d'environ -110°C. Ses caractéristiques ainsi que le point de ramollissement Vicat sont d'autant plus élevés que le taux de cristallinité est important. L'enthalpie de fusion du PE dépend de la structure moléculaire induite par le procédé de polymérisation ainsi que du procédé de mise en forme et plus précisément des conditions de refroidissement/ cristallisation. [126]

II.8.4.Résistances chimique

A cause de sa nature paraffinique non polaire, le PEHD résiste bien aux acides forts et aux bases fortes. Cette résistance chimique est exploitée pour le transport des matières dangereuses dans des fûts extrudés-soufflés en PEHD de masse molaire élevée. La résistance chimique augmente avec le taux de cristallinité et dans une moindre mesure avec la masse molaire. Elle diminue fortement quand la température augmente. En revanche, le PEHD gonfle légèrement

dans les solvants aliphatiques et davantage dans les solvants aromatiques dans lesquels, il se dissout partiellement à haute température. [126]

II.8.5.Comportement aux rayonnements

Le PEHD est sensible au rayonnement solaire, plus particulièrement, dans le domaine UV. Après une exposition prolongée, le vieillissement se traduit par une baisse de la résistance au choc et de l'allongement à la rupture. [126]

II.9. Avantages et les limitations du PEHD

II.9.1 Avantages

Résistant aux produits chimiques

Caractérisé par une haute résistance à la corrosion, le PEHD est un matériau idéal pour la fabrication de produits de stockage de liquides, d'aliments et de produits chimiques aux pH variés. Grâce à cette excellente résistance chimique, il est en mesure de conserver ses propriétés lorsqu'en contact avec des agents chimiques, et demeure donc performant et sécuritaire.

Sans danger pour les aliments

De nombreuses industries choisissent le PEHD pour stocker des aliments ou des boissons puisqu'il est conforme aux normes sanitaires de la FDA. Étant sans danger pour les denrées destinées à la consommation humaine en plus d'être facile à nettoyer, le PEHD est un choix judicieux pour des environnements alimentaires où les standards de salubrité sont un enjeu crucial.

Durable et léger

La masse volumique du PEHD oscille entre 941 kg/m^3 et 965 kg/m^3 selon sa formulation. À titre de comparaison, bien que l'aluminium soit considéré comme très léger, il a pourtant une masse volumique de 2699 kg/m^3 , soit près de 2,8 fois plus lourde que le PEHD. Pour de nombreuses applications où la réduction du poids est primordiale, la légèreté du PEHD est un avantage décisif.

Résistant aux rayons UV

Pour des applications extérieures, la résistance aux rayons UV est une propriété essentielle qui assure la durée de vie optimale d'une pièce ou d'une composante. Contrairement à certains plastiques, le HDPE possède plusieurs formulations qui leur sont résistantes. Ces dernières sont donc la solution idéale pour des applications extérieures. C'est d'ailleurs pourquoi les modules des parcs pour enfants sont très fréquemment fabriqués en PEHD dont la résine contient un stabilisateur UV.

Facilement usinable et soudable

Le polyéthylène de haute densité est un polymère qui s'usine facilement en pièce mécanique, il est aussi facile à souder. Ces soudures, durables et solides, permettent notamment de concevoir des projets de plus grande envergure, tels des revêtements pour bassins de très grandes tailles servant à stocker d'importants volumes de liquide tout en demeurant étanches.

N'absorbe pas l'humidité

Un taux d'absorption d'humidité nul est idéal pour un matériau utilisé pour le stockage de liquides et d'aliments. Ainsi, même lors d'un contact prolongé, le PEHD est un excellent choix pour la conception de réservoirs tout comme pour une utilisation à l'extérieur puisqu'il n'absorbe pas l'humidité.

II.9.2. Les limitations du PEHD

Contraintes mécaniques

Pour des applications où les contraintes mécaniques — friction, compression, impact — sont très importantes, le PEHD n'est pas le meilleur choix.

Chaleur

Pour des applications où la chaleur est une contrainte très importante, le PEHD sera peu adapté puisque la température maximale à laquelle il peut être exposé en continu est seulement de 82,2 °C (180 °F).

II.10. Domaines d'application du PEHD

Le PEHD doit répondre à plusieurs utilisations aux usages très variés on donne ici des exemples pour quelques applications :

Films :

- La sacherie ;
- L'industrie : les emballages, films pour la construction ;
- L'hygiène : couches-bébés ;
- L'agriculture : serres, tunnels...

Objets moulés :

Dans le domaine des objets moulés, le polyéthylène haut densité. S'est développé dans le secteur industriel : manutention, eaux, bouchonnage, et dans les applications techniques telles que le mobilier urbain.

Extrusion-soufflage :

Le domaine de l'extrusion-soufflage est réservé principalement au polyéthylène haute densité pour fabriquer des : bouteilles, flacons, Bidon de lait, récipients pour lessive, détergents...

Tuyaux :

Dans l'application des tuyaux, le polyéthylène haut densité est employé pour la réalisation de tuyauteries de gaz, et pour les tuyaux sous pression, eau chaude, chauffage par le sol.

II.11.conclusion

Les polymères de polyéthylène haute densité (PEHD), aussi appelés HDPE (High-Density Polyethylene), sont des matériaux plastiques largement utilisés en raison de leurs propriétés exceptionnelles et de leur polyvalence.

Ainsi que de sa capacité à être recyclé. Son utilisation omniprésente dans divers secteurs industriels témoigne de sa polyvalence et de son importance. Cependant, la gestion responsable des déchets et le développement de solutions durables restent cruciaux pour minimiser les effets environnementaux de ce matériau.

Chapitre III

Chapitre III:modélisation par la méthode des plans d'expériences

III.1. Introduction

Dans l'industrie, les produits présentent un comportement complexe résultant de multiples caractéristiques qui interagissent entre elles. Pour prédire ce comportement, on élabore d'abord des modèles du produit et des phénomènes connexes, puis on les simule. La précision des modèles employés conditionne la fiabilité des résultats obtenus lors de ces simulations [113, 114].

Les plans d'expérience visent à maximiser l'efficacité en fournissant des informations pertinentes de manière économique. Cette méthode permet de calculer judicieusement le nombre d'essais requis, éliminant ainsi les données inutiles. Elle présente une approche simplifiée et rentable, permettant une optimisation complète des conditions expérimentales. Non seulement elle contribue à améliorer la qualité des produits et des processus, mais elle réduit également les délais et les coûts de développement.

Les plans d'expérience, intégrés à cette approche méthodologique, sont largement adoptés dans la recherche et le développement en milieu industriel, couvrant une diversité de secteurs industriels [115].

Parmi les secteurs d'application des plans d'expériences, on trouve:

- Industries Chimiques: Utilisés pour optimiser les processus chimiques, développer de nouveaux composés et améliorer la qualité des produits.
- Industries Pétrochimiques: Employés pour améliorer les processus de raffinage, de production de polymères, et d'autres procédés chimiques liés au pétrole.
- Industrie Pharmaceutique: Utilisés pour la formulation de médicaments, l'optimisation des processus de fabrication, et les études de stabilité.
- Industries Mécaniques: Appliqués dans la conception et l'amélioration de machines, d'équipements, et dans l'optimisation des processus de fabrication.
- Industrie Automobile: Employés pour le design de véhicules, l'amélioration des performances et de la sécurité, ainsi que dans l'optimisation des processus de production.
- Industrie Métallurgique: Utilisés pour améliorer les processus de fusion, de formage, et pour le développement de nouveaux alliages.

Chapitre III:modélisation par la méthode des plans d'expériences

- Secteur Agroalimentaire: Appliqués dans le développement de nouveaux produits, l'optimisation des processus de production et l'assurance qualité.
- Industrie Aérospatiale: Utilisés pour la conception et les tests de composants aérospatiaux, la réduction des coûts de production et l'amélioration de la fiabilité.
- Électronique et Semi-conducteurs: Appliqués dans la conception de circuits, l'optimisation de la fabrication des semi-conducteurs et la gestion de la qualité.
- Biotechnologie: Employés pour le développement de processus biotechnologiques, l'optimisation de la production de biomolécules, et dans la recherche médicale.

Le but est de sélectionner et de planifier les tests de sorte à identifier économiquement les effets des différents paramètres sur le produit, Cette approche repose sur des techniques statistiques basées principalement sur des principes mathématiques simples .

La méthodologie de surface de réponse, établie dans les années 1940, fusionne des techniques de plan d'expérience, de statistique, de modélisation empirique et d'optimisation mathématique. Son but est d'améliorer la performance des processus et produits, et elle s'avère être un outil efficace pour l'évaluation des risques et la requalification des installations pétrolières .

Ici, les notions mathématiques cruciales pour une compréhension approfondie de la méthode des plans d'expérience sont présentées en détail.

La méthode des plans d'expériences repose sur la compréhension de deux idées essentielles : la conception de l'espace expérimental et la représentation mathématique des variables analysées [113].

III.2. Plans d'expériences

III.2.1. Définition

La méthode des plans d'expériences (MPE), également connue sous le nom de Design of Experiment (DOE), est utilisable dans divers secteurs et industries. Elle est adaptée à une grande variété de domaines et de secteurs, offrant une approche idéale pour explorer les relations entre une variable d'intérêt, y , et des variables x_i , dans le but

Chapitre III:modélisation par la méthode des plans d'expériences

d'optimisation. Des logiciels tels que Matlab et MiniTab sont couramment employés pour faciliter ces analyses [6].

Cette approche vise à identifier une connexion entre deux sortes de grandeurs :

a) La réponse

Souvent appelée Variable Dépendante (VD), cette mesure physique à investiguer représente une caractéristique quantifiable d'un produit ou d'un processus. Sa fluctuation, scrutée en fonction des variations des autres paramètres, présente un défi dans la sélection des réponses appropriées. Ce processus complexe dépasse le cadre de la théorie simple des Plans d'Expériences. Il est impératif de conduire une analyse approfondie des phénomènes, des objectifs, des enjeux et des contraintes afin de déterminer les réponses les plus pertinentes [116].

b) Les facteurs

Les Variables Indépendantes, souvent désignées par l'acronyme VI, représentent des grandeurs physiques manipulables par l'expérimentateur, supposées influencer les variations de la réponse. Elles peuvent se présenter sous forme qualitative (basée sur des catégories ou des qualités) ou quantitative (reposant sur des mesures chiffrées). De plus, elles peuvent être continues (pouvant prendre toute valeur dans un intervalle donné) ou discontinues (restreintes à des valeurs spécifiques). Enfin, elles peuvent être contrôlables (directement ajustables par l'expérimentateur) ou non contrôlables (non ajustables mais pertinentes pour l'étude) [116-118].

Dans le cadre d'une étude expérimentale, un facteur présente une variation définie entre deux niveaux:

- Le niveau bas, symbolisé par -1, qui constitue la borne inférieure,
- Le niveau haut, représenté par +1, qui est la borne supérieure.

c) Interaction

Quand l'effet du facteur A sur la réponse est influencé par la valeur du facteur B, on dit qu'il y a une interaction entre A et B. L'effet de cette interaction, noté AB, représente la combinaison des effets de A et B. Lorsque n facteurs sont impliqués dans une interaction, elle est considérée comme d'ordre n-1.

Chapitre III:modélisation par la méthode des plans d'expériences

III .2.2. Les étapes de la démarche des plans d'expériences

Les plans d'expériences suivent une démarche méthodique comprenant plusieurs étapes clés suivantes :

- **Définition des Objectifs** : Clarifier ce que l'expérience vise à découvrir ou à prouver. Cela implique de comprendre la question de recherche, l'hypothèse ou le problème à résoudre.
- **Sélection des Facteurs, Niveaux et Réponses** : Identifier les variables à étudier (facteurs) et à quelles valeurs (niveaux) elles seront testées. Déterminer également la ou les réponses (variables dépendantes) qui seront mesurées.
- **Choix du Type de Plan d'Expérience** : Selon les objectifs et les ressources disponibles, choisir un plan d'expérience approprié (comme un plan factoriel complet, fractionné, ou séquentiel).
- **Conception de l'Expérience** : Élaborer le schéma expérimental en décidant de l'ordre et de la manière dont les facteurs seront combinés et testés.
- **Collecte de Données** : Mener l'expérience en suivant rigoureusement le plan et enregistrer les données résultantes.
- **Analyse des Données** : Utiliser des méthodes statistiques pour analyser les données recueillies et interpréter les résultats.
- **Interprétation des Résultats** : Tirer des conclusions basées sur l'analyse des données et déterminer si elles soutiennent l'hypothèse ou répondent à la question de recherche.
- **Rapport et Recommandations** : Préparer un rapport détaillé présentant la méthodologie, les résultats, les interprétations et les recommandations basées sur l'étude.

III.2.3. Les avantages

Parmi les avantages majeurs des plans d'expérience, on peut citer :

- La réduction du nombre d'essais nécessaires, ce qui conduit à une baisse des coûts.
- La mise en évidence et la compréhension accrue des interactions entre les paramètres examinés.

Chapitre III:modélisation par la méthode des plans d'expériences

- L'identification des conditions optimales.
- La détection des meilleures conditions pour mener à bien les expériences.
- La possibilité de modéliser et d'optimiser les résultats.

Dans son ensemble, un plan d'expérience vise à examiner et quantifier la relation entre deux types de variables [119]:

- Le facteur (paramètres d'entrée du processus) : Il peut être catégorisé en variable contrôlable ou non contrôlable, voire en états, et il influe sur le système examiné.
- La réponse (paramètres de sortie de l'expérience) : Ce sont des grandeurs mesurées ou observées dans le but d'évaluer les effets des facteurs sur le système.

PEX (Plans d'Expériences) représente une approche méthodologique mathématique utilisée pour concevoir et exécuter efficacement des études scientifiques qui manipulent simultanément les variables d'entrée (X), identifiées comme des facteurs, afin d'analyser leurs effets sur une variable de sortie (ou plusieurs) (Y), généralement appelée réponse.

III.3. La méthode de surface de réponse (MSR)

III.3.1. Définition

La méthodologie de surface de réponse (MSR) englobe différentes méthodes statistiques et mathématiques qui se révèlent particulièrement bénéfiques dans le processus de développement. Elle s'avère particulièrement pertinente lorsque plusieurs variables d'entrée influencent les performances et la qualité d'un produit ou d'un processus. Parfois appelée "modèle de régression polynomiale" ou "modèle polynomial", la MSR offre des outils puissants pour analyser et optimiser les relations complexes entre ces variables [120].

Cette approche propose des méthodes mathématiques et statistiques permettant d'analyser les liens entre une ou plusieurs variables de réponse (VD) et un ensemble de facteurs (VI).

Chapitre III:modélisation par la méthode des plans d'expériences

Afin de maximiser une réponse ou d'équilibrer plusieurs réponses, il est crucial d'identifier un ensemble de réglages des facteurs qui répondra de manière optimale aux exigences définies en termes de réponse. Pour développer un modèle de surface de réponse, il est indispensable d'analyser les variations des résultats des essais obtenus à partir d'un plan d'expérience [113].

La Méthode des Surfaces de Réponse (MSR) inclut les aspects suivants :

- Une démarche expérimentale pour sonder les divers paramètres du processus.
- L'application de modèles empiriques pour définir une relation approximative entre le rendement et les variables du processus.
- L'utilisation de méthodes d'optimisation afin d'identifier les valeurs des variables du processus qui génèrent des résultats souhaitables de la réponse [118].

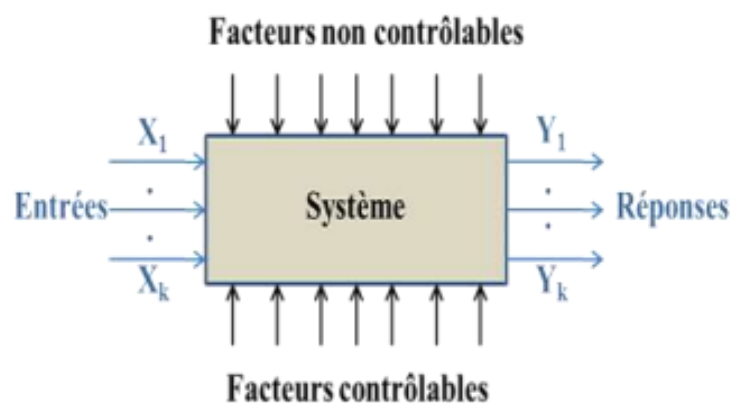


Figure III.1. Schéma simplifié de l'environnement d'un système donné

Les facteurs peuvent être classés de la manière suivante :

- Facteurs Contrôlables : Ceux directement influencés par le technicien, tels que la pression, la température ou le choix du matériau.
- Facteurs Non Contrôlables : Ceux qui évoluent indépendamment des décisions du technicien, comme les conditions climatiques ou l'environnement d'utilisation.
- Facteurs d'Entrée à Analyser : Ceux dont l'impact est souhaité à évaluer, comme la matière première, la vitesse d'agitation, la température ou le rendement.

III.4. Notion d'espace expérimental

Dans le cadre d'une étude, un chercheur mesure systématiquement une certaine grandeur appelée "réponse" à chaque essai. Cette "réponse" constitue le cœur de l'étude et son évaluation dépend de plusieurs éléments, désignés ici comme "facteurs" plutôt que variables. La variation de la réponse dépend ainsi d'un ou de plusieurs de ces facteurs. Pour visualiser l'impact d'un facteur spécifique, il est possible de le représenter sur un axe gradué, comme illustré dans la Figure III.2. L'attribution d'une valeur à un facteur dans un essai est appelée le "niveau" de ce facteur. Lorsqu'on examine l'effet d'un facteur, il est courant de limiter ses variations à une plage définie, avec un niveau bas et un niveau élevé comme bornes [113].

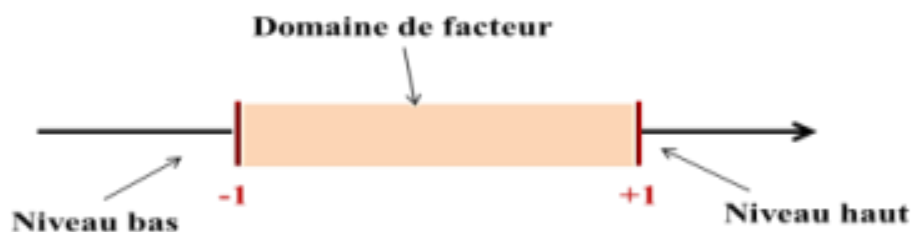


Figure III.2. Le domaine de variation du facteur est constitué de toutes les valeurs

Dans une expérience, l'intervalle de toutes les valeurs potentielles d'un facteur, délimité par son niveau bas (-1) et son niveau haut (+1), est désigné comme son domaine de variation. Ce domaine inclut toutes les valeurs envisageables du facteur dans le cadre de l'expérience.

Lorsqu'un deuxième facteur est pris en considération dans une étude, il est également représenté par un axe gradué, perpendiculaire au premier. On attribue à ce deuxième facteur des niveaux haut et bas, délimitant ainsi son domaine de variation. Cette disposition crée un système de coordonnées cartésiennes, formant un espace euclidien à deux dimensions, désigné sous le nom d'espace expérimental, comme illustré dans la Figure III.3.

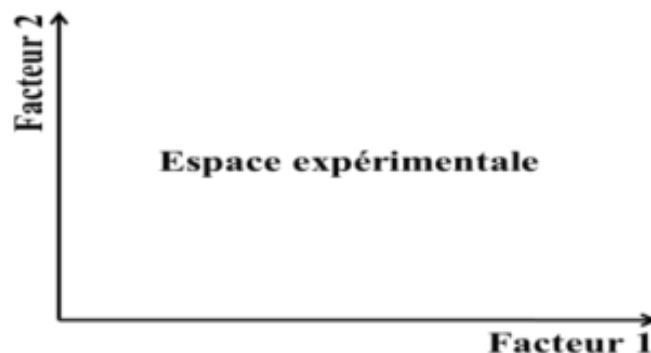


Figure III.3. L'espace expérimental

III.5. Notion de surface de réponse

Dans le cadre expérimental, les niveaux x_i représentent les coordonnées d'un point spécifique, tandis que la valeur y correspond à la mesure de la réponse à ce point. Pour illustrer cette relation, un axe supplémentaire, perpendiculaire à l'espace expérimental, est ajouté, dédié exclusivement à la réponse. Ainsi, une structure tridimensionnelle est créée pour l'analyse des données [121].

Pour visualiser à la fois le plan d'expériences et les réponses obtenues de manière géométrique, il est nécessaire d'utiliser un espace ayant une dimension de plus que l'espace expérimental original. Par exemple, dans le cas d'un plan comportant deux facteurs, un espace tridimensionnel est requis : une dimension est attribuée à la réponse, tandis que les deux autres représentent chacun des facteurs [113].

III.6. Objectif de modélisation

L'exploitation de ces modèles présente une gamme étendue de possibilités et peut servir à différents objectifs en fonction des besoins spécifiques :

III.6.1. Objectif de prédiction

Avec le modèle mathématique établi, il devient envisageable de prédire la réponse pour un point donné, à l'intérieur des limites des domaines expérimentaux. Ces prédictions, agrégées sur toute l'étendue du domaine d'étude, génèrent une surface nommée "surface de réponse", expliquée en détail dans la Figure III.4 [117].

Trouver le nombre optimal de points d'expérience et leur placement adéquat représente un défi crucial dans la conception des plans d'expériences. L'objectif est

Chapitre III:modélisation par la méthode des plans d'expériences

d'obtenir une précision élevée sur la surface de réponse tout en évitant une multiplication excessive des expériences.

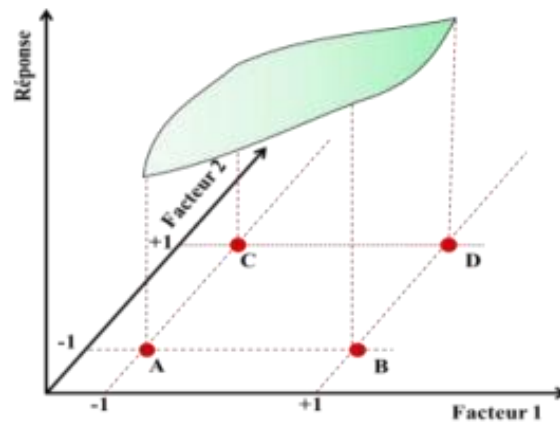


Figure III.4. La surface de réponse.

III.6.2. Objectif d'optimisation

L'optimisation des processus cherche à trouver les valeurs optimales pour les paramètres d'entrée afin d'atteindre les résultats souhaités. Ces objectifs incluent souvent l'augmentation du rendement du processus, la réduction du temps de production ou la satisfaction des spécifications du produit (comme présenté dans la Figure III.5).

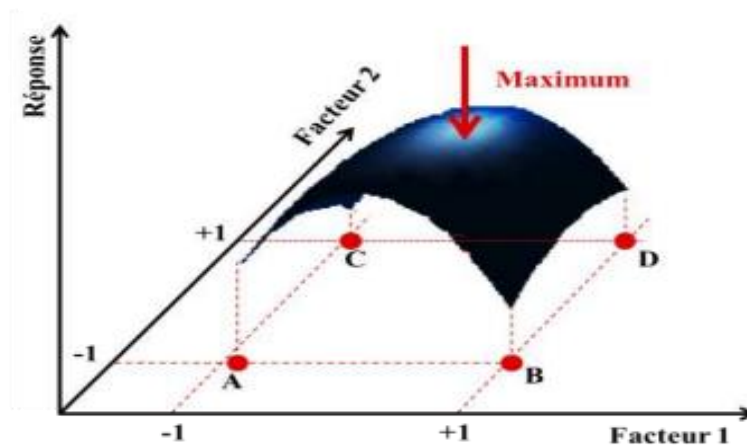


Figure III.5. L'optimisation de la réponse

Chapitre III:modélisation par la méthode des plans d'expériences

III.7. Principes de Base de la modélisation mathématique

Au départ, on choisit une fonction mathématique pour représenter la relation entre la réponse et les facteurs. Pour simplifier cette relation, on recourt à un développement en série de Taylor-Mac Laurin, supposant que les dérivées sont constantes. Cela conduit à une expression sous forme de polynôme, dont le degré varie selon le niveau de complexité désiré :

$$y_i = a_0 + \sum x_i a_i + \sum x_i x_j a_{ij} + \dots + \sum x_i^2 a_{ii} + a_{jj} \dots x_i x_j \dots \dots x_z \quad (1)$$

Où :

- La variable " y ", mesurée avec précision lors des expériences, représente la réponse recherchée.
- Les niveaux "xi" correspondent aux valeurs attribuées aux facteurs par l'expérimentateur pour chaque essai, supposées exactes et sans erreur selon l'hypothèse classique en régression.
- Les coefficients "a0, ai, aij, aii" du modèle mathématique choisi doivent être estimés à partir des données expérimentales, car leur valeur n'est pas connue à l'avance.

L'intérêt principal de l'utilisation d'un polynôme pour modéliser la réponse réside dans sa capacité à extrapoler toutes les réponses possibles dans le domaine d'étude, ce qui évite la nécessité de mener des expériences réelles.

Ce modèle est souvent désigné comme un "modèle postulé" ou "modèle a priori".

Pour simplifier, les deux types d'écarts - le manque d'ajustement et l'erreur expérimentale - sont souvent combinés en une seule variable, notée "e". De cette manière, le modèle employé par l'expérimentateur s'exprime comme suit :

$$y_i = a_0 + \sum x_i a_i + \sum x_i x_j a_{ij} + \dots + \sum x_i^2 a_{ii} + a_{jj} \dots x_i x_j \dots \dots x_z + e \quad (2)$$

III.7.1. les aspects clés de la régression linéaire multiple dans le contexte de la modélisation

La régression linéaire multiple est utilisée pour analyser des données quantitatives, avec pour objectif principal de déterminer comment une variable de réponse (y) est liée à plusieurs variables explicatives x_1, x_2, \dots, x_k .

Chapitre III:modélisation par la méthode des plans d'expériences

$$y=(x_1,x_2,\dots,x_k) \quad (3)$$

III.7.2. Variables codées

L'utilisation de variables centrées et codées dans la plage de -1 à +1 permet de standardiser le domaine de variation pour tous les facteurs, ce qui facilite la généralisation de la théorie des plans d'expériences. En utilisant des variables codées, chaque facteur possède un domaine de variation standardisé de [-1, +1], ce qui simplifie la comparaison de leurs effets. Dans le modèle final, ce sont ces variables codées, sans dimensions et comprises entre -1 et +1, qui sont utilisées :

$$x_i = \frac{u_i - \left(\frac{u_{\min,i} + u_{\max,i}}{2}\right)}{\left(\frac{u_{\max,i} - u_{\min,i}}{2}\right)} \quad (4)$$

Où :

- x_i est la valeur codée.
- u_i est la valeur réelle du facteur.
- $u_{\min i}$ est la valeur minimale du facteur.
- $u_{\max i}$ est la valeur maximale du facteur.

III.8. Plans factoriels

Les plans factoriels permettent d'étudier simultanément plusieurs facteurs, qu'ils soient qualitatifs ou quantitatifs. L'objectif est d'identifier les facteurs ayant un impact significatif sur la réponse et d'évaluer l'importance des interactions entre eux, en fonction du type de plan d'expériences choisi [118].

III.8.1. Plans factoriels complets à deux niveaux

Dans ce type de plans factoriels, chaque facteur est évalué à deux niveaux distincts, -1 et +1. Cette restriction à deux niveaux, lorsqu'elle est appliquée à un plan factoriel

Chapitre III:modélisation par la méthode des plans d'expériences

complet, réduit le nombre d'essais nécessaires tout en permettant une analyse exhaustive de tous les facteurs et de leurs interactions. Des exemples de ces plans pour deux et trois facteurs sont illustrés dans la Figure II.6 [118].

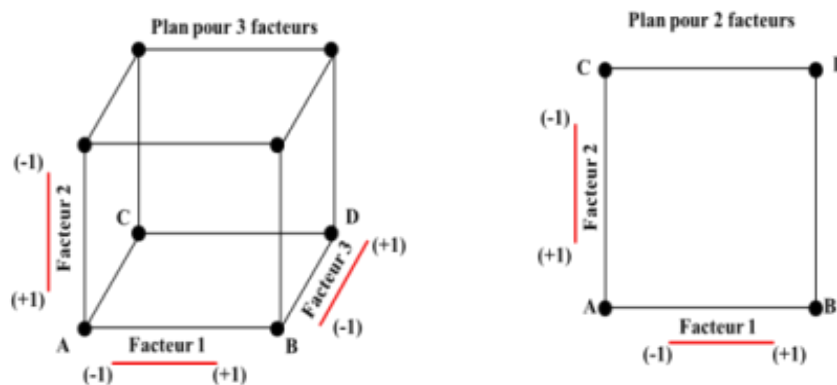


Figure III.6. Plans factoriels complets 2^2 et 2^3

III.8.2. Matrice d'expériences

Chaque matrice d'expériences présente les combinaisons des niveaux haut et bas de chaque facteur, codés en +1 et -1. Pour deux facteurs, cela se traduit par quatre essais [118]. Un plan comprenant kk facteurs est appelé un plan $2k2k$. Le nombre d'expériences à réaliser sera donc de $2k2k$. Ce nombre peut rapidement devenir très élevé.

Ces matrices sont conçues à l'aide de Matlab, en alternant des groupes de 2^{c-1} en -1 et 2^{c+1} en +1 dans chaque colonne, comme illustré dans les Tableaux II.1 et II.2 pour des plans factoriels complets 2^2 et 2^3 .

Tableau III.1. Organisation des matrices d'expériences dans le contexte des plans

Factoriels complets 2^2

Exp	X ₁	X ₂
1	-1	-1
2	+1	-1
3	-1	+1
4	+1	+1

Chapitre III:modélisation par la méthode des plans d'expériences

Tableau III.2. Organisation des matrices d'expériences dans le contexte des plans factoriels complets 2^3

Exp	X ₁	X ₂	X ₃
1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1
4	+1	+1	-1
5	-1	-1	+1
6	+1	-1	+1
7	-1	+1	+1
8	+1	+1	+1

Le modèle mathématique proposé utilise une approche linéaire pour chaque facteur, indiquant une relation de premier degré. L'équation II.5 illustre ce modèle sans inclure d'interactions.

$$y_i = a_0 + \sum_{i=1}^k x_i a_i + e$$

(III. 5)

Où :

- a_0 représente l'effet théorique.
- a_i représentent les effets principaux des différents facteurs.

Le modèle avec interactions de second ordre évalue les effets des interactions entre deux facteurs. Ces effets sont quantifiés et représentés par les coefficients I_{ij} dans l'équation III.6.

$$y_i = a_0 + \sum_{i=1}^k x_i a_i + \sum_{i < j}^k I_{ij} x_i x_j + e$$

(III. 6)

Chapitre III:modélisation par la méthode des plans d'expériences

L'équation III.7 décrit le modèle complet qui inclut k facteurs ainsi que toutes leurs interactions mutuelles.

$$y_i = a_0 + \sum_{i=1}^k x_i a_i + \sum_{i < j}^k I_{ij} x_i x_j + \dots + \sum_{i < j < \dots < k} I_{ij \dots k} x_i x_j \dots x_k + e \quad (\text{III. 7})$$

II.8.3. Effets globaux et effets moyens

Considérons la matrice d'expériences, y compris les réponses (y_i), présentée dans le Tableau III.3, correspondant à un plan factoriel complet 2^2 pour deux facteurs, désignés x_1 et x_2 .

Tableau II.3. Matrice d'expériences avec réponses pour un plan factoriel complet 2^2

Exp	x_1	x_2	Réponse y_i
1	-1	-1	y_1
2	+1	-1	y_2
3	-1	+1	y_3
4	+1	+1	y_4

Il est possible de quantifier à la fois les effets principaux des facteurs et leurs interactions :

a) Les effets moyens d'un facteur

Pour calculer les effets moyens d'un facteur, on prend les moyennes des réponses pour les niveaux -1 et +1. . Ces effets pour le facteur x_1 sont représentés par les équations III.8 et III.9.

$$a_1^- = \frac{y_1 + y_3}{2} \quad (\text{III. 8})$$

$$a_1^+ = \frac{y_2 + y_4}{2} \quad (\text{III. 9})$$

Chapitre III:modélisation par la méthode des plans d'expériences

De la même manière, les effets moyens pour le facteur x_2 sont calculés et présentés dans les équations III.10 et III.11.

$$a_2^- = \frac{y_1+y_2}{2} \quad (\text{III. 10})$$

$$a_2^+ = \frac{y_3+y_4}{2} \quad (\text{III. 11})$$

b) Effet global d'un facteur

On définit l'effet global d'un facteur comme étant l'écart moyen de la réponse lorsque l'on passe du niveau le plus bas au niveau le plus haut du facteur. Dans le cadre d'un plan factoriel équilibré avec deux niveaux, on estime cet effet en calculant la variation moyenne de la réponse entre les deux niveaux du facteur [122] où chaque niveau est quantifié par son effet moyen.

$$a_1 = \frac{a_1^- + a_1^+}{2} = \frac{-Y_1 + Y_2 - Y_3 + Y_4}{4} \quad (\text{III. 12})$$

$$a_2 = \frac{a_2^- + a_2^+}{2} = \frac{-Y_1 - Y_2 + Y_3 + Y_4}{4} \quad (\text{III. 13})$$

Dans un modèle basé sur un polynôme, les coefficients des termes de premier degré correspondent aux effets des différents facteurs.

c) Réponse théorique

Cette valeur représente la moyenne des réponses enregistrées aux deux niveaux expérimentaux, -1 et +1.

$$a_0 = \frac{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4}{4} \quad (\text{III. 14})$$

d) Effets des interactions

Lorsque nous évaluons l'interaction entre les variables x_1, x_2, \dots, x_k , une nouvelle colonne est ajoutée à la matrice des effets, appelée x_i, x_j, \dots, x_k Cette colonne est

Chapitre III:modélisation par la méthode des plans d'expériences

obtenue en multipliant les valeurs correspondantes des colonnes des variables concernées. Le calcul de l'effet moyen et de l'effet global de cette interaction se fait de la même manière que pour un effet de facteur isolé. Le Tableau III.4 présente cette matrice pour les effets principaux et les interactions dans un plan factoriel complet à deux facteurs.

Tableau III.4. Matrice d'expériences avec effets pour un plan factoriel complet 2^2

Exp	Moy	x_1	x_2	$x_1 x_2$	Réponse (y_i)
1	-1	-1	-1	+1	y_1
2	+1	-1	+1	-1	y_2
3	-1	+1	-1	-1	y_3
4	+1	+1	+1	+1	y_4
Effets a_i	a_0	a_1	a_2	I_{12}	

Par conséquent, Le coefficient I_{12} représente la variation de l'impact de x_1 en fonction des ajustements de x_2 , et vice versa. De manière similaire, il indique également comment l'effet de x_2 varie en réponse à des changements dans le niveau de x_1 .

$$I_{12} = \frac{I_{12}^- + I_{12}^+}{2} = \frac{Y_1 + Y_2 + Y_3 - Y_4}{4} \quad (\text{III. 15})$$

Par conséquent, on peut exprimer le modèle mathématique linéaire sous la forme de l'équation III.16

$$y = a_0 + x_1 a_1 + x_2 a_2 + I_{12} x_1 x_2 + e \quad (\text{III. 16})$$

III.8.4. Régression linéaire et analyse du modèle

III.8.4.1. Régression linéaire

Après avoir réalisé le plan d'expériences, on peut établir un système de n équations correspondant aux n essais et résoudre pour p inconnues, représentant les p coefficients du modèle. Cette formulation est simplifiée en utilisant la notation matricielle. Il y a souvent une différence entre les réponses calculées par le modèle et celles mesurées

Chapitre III:modélisation par la méthode des plans d'expériences

expérimentalement. Cette différence, appelée écart de modélisation, est exprimée par le vecteur \mathbf{a} .

$$y = Xa + e \quad (\text{III. 17})$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{p1} \\ 1 & x_{21} & & x_{p1} \\ & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \dots & x_{p1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_n \end{bmatrix} \quad (\text{III. 18})$$

Où :

- \mathbf{y} : représente le vecteur des réponses mesurées dans l'expérience.
- \mathbf{X} : design la matrice associée au modèle, élaborée à partir des points expérimentaux et du modèle préétabli.
- \mathbf{a} : représente le vecteur des coefficients du modèle.
- \mathbf{e} : représente les écarts entre les réponses réelles et les prédictions du modèle.

Dans ce cas, le système ne peut pas être résolu directement car le nombre d'équations (\mathbf{n}) est généralement inférieur au nombre d'inconnues (\mathbf{pn}). Pour surmonter cette difficulté, une méthode de régression, souvent celle des moindres carrés, est employée pour estimer les coefficients, représentés dans le vecteur $\hat{\mathbf{a}}$.

$$\hat{\mathbf{a}} = (\mathbf{X}^t \mathbf{X})^{-1} (\mathbf{X}^t) (\mathbf{Y}) \quad (\text{III. 19})$$

Où \mathbf{X}^t est la transposée de la matrice \mathbf{X} .

Il existe divers logiciels qui facilitent le calcul direct des coefficients, rendant cette tâche plus accessible.

III.8.4.2. Test de validation du modèle

L'analyse de la variance (ANOVA) permet d'évaluer la significativité des effets des facteurs. Pour ce faire, on compare la variation due à un facteur lorsqu'il est inclus dans le modèle à la variance résiduelle. Si le facteur est exclu du modèle, son effet se retrouve dans la variance résiduelle. En observant les variations de cette variance résiduelle, on peut déterminer si le facteur a un impact significatif sur la réponse. Cette comparaison et observation permettent d'identifier l'influence notable du facteur sur la réponse [117].

Chapitre III:modélisation par la méthode des plans d'expériences

Lorsque l'on compare plus de deux échantillons, l'ANOVA est employée pour détecter des différences significatives entre les moyennes des échantillons. Cette analyse inclut le test F (Fisher-Snedecor), qui évalue la significativité globale de la régression, mais ne fournit pas d'informations sur la significativité individuelle de chaque coefficient.

Pour cela, le test de Student est utilisé, examinant la signification de chaque coefficient séparément.

Cela implique la vérification des hypothèses suivantes:

$$H_0: a_1 = a_2 = \dots = a_p = 0$$

H_1 : Il existe au moins un $a_i \neq 0$.

La variance totale de la variable à expliquer se divise en deux composantes : la part expliquée par le modèle et la part correspondant à la variance résiduelle.

- **Somme Totale des Carrés des Écartés (STCE)** : est définie comme la somme de tous les carrés des écarts, après correction, pour y .

$$STCE = \sum_{i=1}^n (y_i - y_{moy})^2 = SCEL + SCER \quad (\text{III. 20})$$

- **Somme des Carrés des Écartés dus à la Liaison (SCEL)** : Ceci désigne la somme accumulée des écarts au carré résultant de la liaison, tels qu'expliqués par le modèle.

$$SCEL = \sum_{i=1}^n (y_i^{est} - y_{moy})^2 \quad (\text{III. 21})$$

- **Somme des Carrés des Écartés des Résidus (SCER)** : Elle représente la somme globale des différences au carré de tous les résidus.

$$SCER = \sum_{i=1}^n \hat{e}^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - y_i^{est})^2 \quad (\text{III. 22})$$

En tenant compte de ces notations :

- y_i représente les valeurs de réponse réellement observées lors de l'exécution des expériences.
- y_{moy} est la valeur moyenne de ces réponses observées.

Chapitre III:modélisation par la méthode des plans d'expériences

- y_i^{est} désigne les valeurs de réponse prédites ou estimées en utilisant le modèle en question.

La variance moyenne pour chaque composant du modèle est mesurée de la manière suivante : le Carré Moyen pour la Liaison représente la variance expliquée par le modèle, tandis que le Carré Moyen pour les Résidus et le Carré Moyen Total évaluent la variance due aux erreurs ou à l'imprécision du modèle. Ces valeurs sont obtenues en divisant les sommes des carrés (CML, CMR et CMT) par leurs degrés de liberté respectifs, ce qui permet de normaliser la somme des carrés par rapport au nombre d'observations ou de paramètres dans le modèle.

- **SCEL** possède $p - 1$ degrés de liberté où "p" est le nombre de coefficients estimés dans le modèle. Cela signifie que si le modèle a, par exemple, 6 coefficients, la SCEL aura 5 degrés de liberté.
- **SCER** possède $n-p$ degrés de liberté où "n" représente le nombre total d'expériences réalisées. Donc, si 50 expériences sont réalisées et le modèle à 6 coefficients, la SCER aurait 44 degrés de liberté.
- **STCE** possède $n-1$ degré de liberté. avec "n" étant le nombre d'expériences. Ainsi si 50 expériences sont réalisées, la STCE aurait 49 degrés de liberté.

Le format standard d'un tableau d'analyse de variance (ANOVA) est organisé comme suit:

Tableau III.5. Tableau d'ANOVA

Variation due à	Somme des carrés	ddl	Carré moyen	F
Liaison	SCEL	$p-1$	$\frac{SCEL}{p-1} = CML$	$F_{cal} = \frac{CML}{CMR}$
Résidus	SCER	$n-p$	$\frac{SCER}{n-p} = CMR$	
Totale	STCE	$n-1$	$\frac{STCE}{n-1} = CMT$	

Chapitre III:modélisation par la méthode des plans d'expériences

Le **test F** est utilisé pour évaluer la significativité statistique dans l'analyse de la variance, en suivant ces étapes :

- Calcul du F observé (**F_{cal}**) : Ce calcul est réalisé dans le tableau d'ANOVA, en comparant la variance expliquée par le modèle avec la variance résiduelle (erreur).
- Lecture du F critique (**F_{crit}**) : On détermine cette valeur à partir du Tableau de Fisher Snedecor en utilisant les degrés de liberté. Les degrés de liberté du numérateur sont $ddl_1=p-1$ et ceux du dénominateur sont $ddl_2=n-p$ où p est le nombre de coefficients estimés et n le nombre total d'expériences.
- Fixation du niveau de risque α : Le seuil α est choisi à l'avance, souvent à 0,05 ou 0,01, représentant la probabilité acceptable d'erreur de Type I (rejet à tort de l'hypothèse nulle).
- Comparaison de **F_{cal}** avec **F_{crit}**: L'hypothèse nulle (**H₀**), qui stipule généralement qu'il n'y a pas de différence significative ou aucun effet du modèle, est rejetée si $F_{cal} > F_{crit}$.

L'acceptation ou le rejet de l'hypothèse nulle (**H₀**) dans une analyse de la variance (ANOVA) a des implications significatives pour l'interprétation des résultats

Accepter H₀ : Conclure qu'il n'existe pas de relation globale significative entre les variables indépendantes **x_i** et la variable dépendante **y**. Cela peut être dû à plusieurs raisons :

- **Modèle Inadéquat** : Le modèle statistique utilisé pourrait ne pas être approprié pour capturer la relation entre les variables. Cela peut être dû à un mauvais choix de variables, à une mauvaise spécification du modèle, ou à l'absence de certaines variables importantes.
- **Peu ou Pas d'Influence des x_i sur y** : Il est possible que les variations dans les variables indépendantes **x_i** n'aient qu'une influence mineure ou aucune influence sur la variable dépendante **y**. Cela indique que d'autres facteurs, non inclus dans le modèle, pourraient être responsables de la variation observée dans **y**.

Rejeter H₀ : Cette conclusion implique qu'il existe une relation significative entre les variations des variables indépendantes **x_i** et la variation de la variable dépendante

Chapitre III:modélisation par la méthode des plans d'expériences

y. Cela signifie que les changements dans x_i sont statistiquement associés à des changements dans y , indiquant que le modèle est capable de capturer une part significative de la relation entre ces variables.

Autrement dit :

- Si $F_{cal} > F_{crit}$. alors le modèle de régression linéaire est considéré comme valide. Cela signifie que les variables indépendantes incluses dans le modèle ont un effet significatif sur la variable dépendante.
- En revanche, cela suggère que le modèle n'explique pas de manière significative la variation dans les données et que les variables indépendantes ne sont pas utiles pour prédire la variable dépendante.

III.9. Logiciels de plans d'expériences

La création de plans d'expériences peut paraître simple et facile, car on peut parfois choisir parmi des matrices déjà publiées. Toutefois, il est crucial que le plan soit véritablement adapté à l'étude et à ses objectifs, plutôt que d'essayer de faire correspondre l'étude à des plans préexistants. Dans certaines situations, il est donc indispensable de concevoir un plan sur mesure afin d'obtenir des résultats pertinents et significatifs.

Heureusement, les logiciels spécialisés dans la conception de plans d'expériences proposent des bibliothèques de plans classiques, utiles dans de nombreuses situations. De plus, ces logiciels permettent de concevoir des plans d'expériences spécifiques et personnalisés pour répondre aux besoins uniques d'une étude particulière. Cette flexibilité permet aux chercheurs de créer des plans optimisés en fonction de leurs paramètres d'intérêt et de leurs contraintes expérimentales, assurant ainsi une meilleure qualité des données et des conclusions plus robustes.

L'estimation des coefficients peut être réalisée avec un programme de feuille de calcul, mais cela demande de la programmation et du temps. Il est donc préférable d'utiliser un logiciel spécialisé, qui effectue non seulement le calcul des coefficients, mais aussi les analyses statistiques nécessaires pour évaluer la qualité du modèle mathématique.

L'estimation des coefficients d'un modèle de régression peut se faire avec des logiciels de feuille de calcul, mais cela exige souvent de la programmation et un investissement

Chapitre III:modélisation par la méthode des plans d'expériences

de temps considérable. Par conséquent, il est souvent préférable d'utiliser un logiciel spécialisé en analyse de régression, qui réalise non seulement le calcul des coefficients, mais aussi les analyses statistiques nécessaires pour évaluer la qualité du modèle mathématique.

Les logiciels spécialisés dans l'analyse de régression, tels que JMP, Minitab, Statistica, Statgraphics, Unscrambler, Pirouette, Modde, StatsModels, scikit-learn, et autres logiciels statistiques, simplifient grandement le processus d'estimation des coefficients et d'évaluation du modèle. Ils fournissent des résultats statistiques tels que les valeurs p , les valeurs R^2 , les intervalles de confiance, les tests de significativité des coefficients, et les diagnostics des résidus, permettant aux chercheurs de mieux comprendre la qualité de leur modèle.

En utilisant un logiciel spécialisé, les chercheurs peuvent gagner du temps, éviter des erreurs potentielles de programmation, et accéder à une gamme complète d'outils statistiques pour une analyse approfondie de leurs données de régression. Cela est essentiel pour prendre des décisions éclairées basées sur les résultats du modèle.

III.10. Conclusion

Ce chapitre explore des éléments bibliographiques essentiels de la Méthodologie des Plans d'Expériences (MPE). Nous avons d'abord examiné les différents types de variables utilisées dans cette approche, ainsi que les définitions du domaine d'étude, décrivant la gamme de valeurs des variables d'intérêt, et du domaine d'étude possible, qui peut être contraint en termes de positions ou de valeurs atteintes par les variables.

Le deuxième volet de ce chapitre met l'accent sur un aspect fondamental de la MPE : la modélisation. Nous avons exploré les principales techniques mathématiques utilisées pour exprimer les variations des réponses en fonction des valeurs des facteurs. La modélisation est cruciale en MPE car elle aide à comprendre l'influence des variables d'entrée (facteurs) sur les variables de sortie (réponses) et à formuler des relations mathématiques qui décrivent ces interactions.

Les Plans d'Expériences (PE) servent principalement d'outil pour gérer et organiser les campagnes expérimentales. Leur objectif principal est de fournir des informations facilement interprétables. Pour cela, la conception des expériences doit permettre de

Chapitre III:modélisation par la méthode des plans d'expériences

créer un modèle exploratoire du domaine expérimental, constituant ainsi la base de la stratégie expérimentale.

Il existe plusieurs familles de modèles adaptées aux objectifs des expérimentateurs. Lorsqu'ils sont utilisés de manière appropriée, les PE offrent plusieurs avantages significatifs, notamment une réduction des délais de conception et de production, des coûts réduits, une plus grande précision dans l'obtention des résultats expérimentaux, et une fiabilité accrue dans les conclusions tirées.

On peut résumer la procédure employée pour conduire une expérimentation de manière optimale en un schéma synthétique comprenant trois principales étapes :

- Sélection de la méthode expérimentale appropriée.
- Évaluation des résultats obtenus.
- Progression dans l'acquisition des résultats au fil du temps

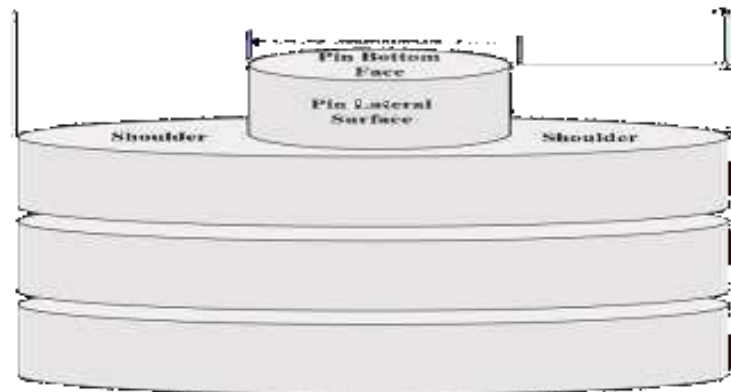
Chapitre IV

IV.1. Introduction

Cette étude utilise des approches de de expérimentale et de simulation pour générer trois interfaces significatives générant un flux thermique entre l'outil et le travail (épaulement de l'outil, surfaces latérales et inférieures de l'axe).

Dans ce chapitre, la modélisation et la simulation numérique du transfert de chaleur entre l'outil et les tôles à souder ont été réalisées. L'apport de chaleur provenant des trois surfaces

- i) l'épaulement.
- ii) la surface latérale de la broche.
- iii) la surface inférieure de la broche.



Figur.IV.1. Régions/interfaces de l'entrée des énergies et de la géométrie de l'outil du Procédé FSW

L'outil de soudage FSW principal utilisé dans ce travail (voir Figure IV.1), est composé d'un épaulement de 14 mm de diamètre avec une tige cylindrique filetée de 6 mm de diamètre et de 4 mm de hauteur.

IV.2.étude expérimentale



Dans cette étape, l'outil destiné au soudage par friction a été installé sur la machine, puis deux morceaux de PEHD ont été installés avec des vis afin de les souder ensemble et prendre les données requises.

IV.3.résultat

Tableau IV.1 résultats expérimentaux (plan complet à deux n)

les pièces	vc tr/mn	vf mm/mn	rot degree	T c°
1	1600	15	0	36
2	1600	10	0	29
3	1800	15	0	30
4	1800	10	0	28
5	1600	15	5	28
6	1600	10	5	27
7	1800	15	5	32
8	1800	10	5	29

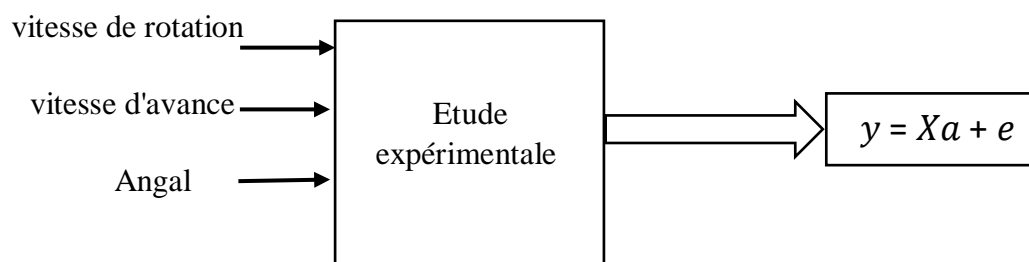
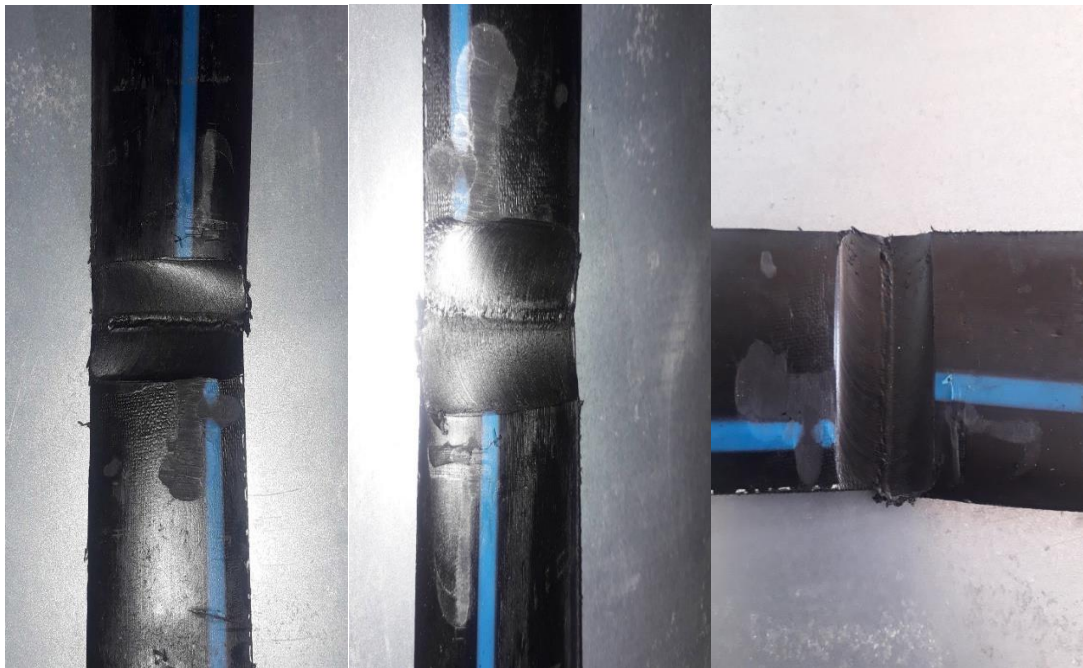


Figure .IV.2 .Modèle mathématique.

La matrice des expériences traduit la conception des expériences où les valeurs physiques (facteurs) sont codées, c'est à dire la valeur : -1 pour le niveau bas et +1 (pour niveaux hauts

Tableau IV.2.matrice expérience (valeurs codées)

N test	vitesse de rotation (N tr/mn)	vitesse de coupe a (mm/mn)	angle d'outil	interac tion I12	I13	I23	T c° exp	T C° The	Ecart type
1	-1	1	-1	-1	1	-1	36	35.125	0.875
2	-1	-1	-1	1	1	1	29	29.875	-0.875
3	1	1	-1	1	-1	-1	30	30.875	-0.875
4	1	-1	-1	-1	-1	1	28	27.125	0.875
5	-1	1	1	-1	-1	1	28	28.875	-0.875
6	-1	-1	1	1	-1	-1	27	26.125	0.875
7	1	1	1	1	1	1	32	31.125	0.875
8	1	-1	1	-1	1	-1	29	29.875	-0.875

III.3.1. Formule globale du modèle mathématique

$$y_i = a_0 + \sum_{i=1}^k x_i a_i + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k I_{ij} x_i x_j + e_i$$

(IV.1)

Le terme e_i est la différence entre la valeur expérimentale et celle donnée par Polynôme. La résolution du système (1) équivaut à la solution de l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{p1} \\ 1 & x_{21} & & x_{p1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \dots & x_{p1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_n \end{bmatrix}$$

Les coefficients sont trouvés par l'expression suivante :

$$\text{Coefficients} = (X^t \cdot X)^{-1} \cdot X^t \cdot Y$$

Tableau IV.3. Coefficients du modèle

<i>Facteurs</i>	<i>coefficients</i>	
moyenne générale	a_0	29.87
vitesse de rotation	a_1	-0.125
vitesse d'avance	a_2	1.82
angle d'outil	a_3	0.87
Interaction vitesse de rotation / vitesse d'avance	I_{12}	-0.375
Interaction vitesse de rotation / angle d'outil	I_{13}	1.625
Interaction vitesse d'avance / angle d'outil	I_{23}	-0.625

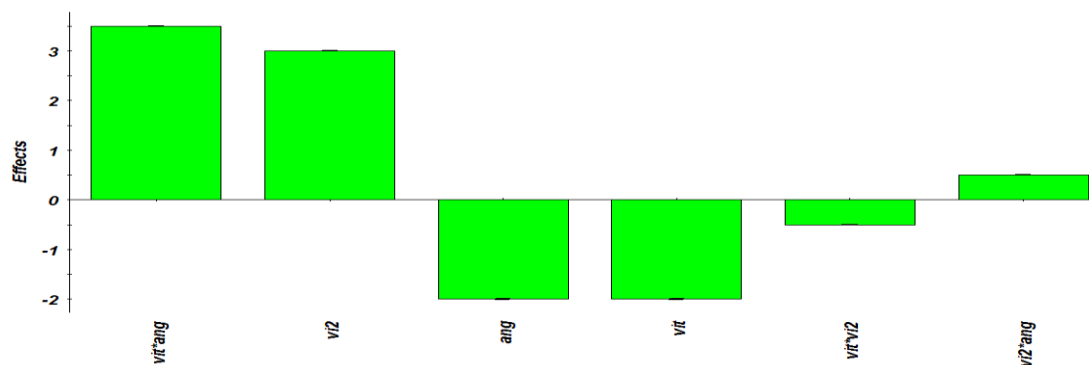
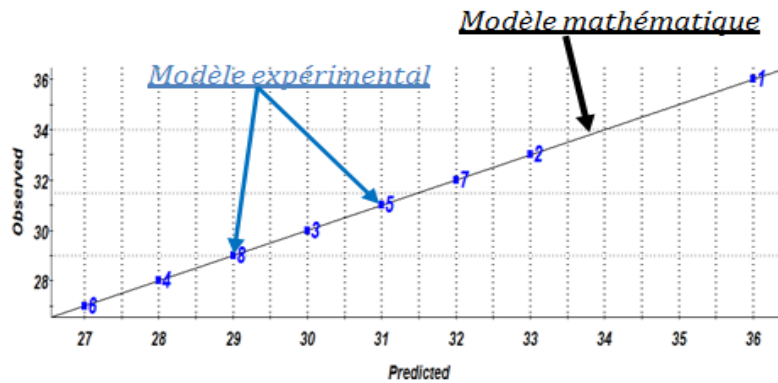


Figure .IV.2. Diagramme à barres montrant les effets de divers facteurs et leurs interactions sur une réponse variable.

IV.4. Validation du modèle



Figur.IV.3. Rapport entre les deux modèles.

Cette corrélation peut également être illustrée en traçant les réponses mesurées, sur la base des réponses estimées. Ceci est donné par la figure IV.3, qui montre une forte corrélation entre les deux modèles.

IV.5.interprétation des résultats

IV.5.1. effet d'un seul facteur

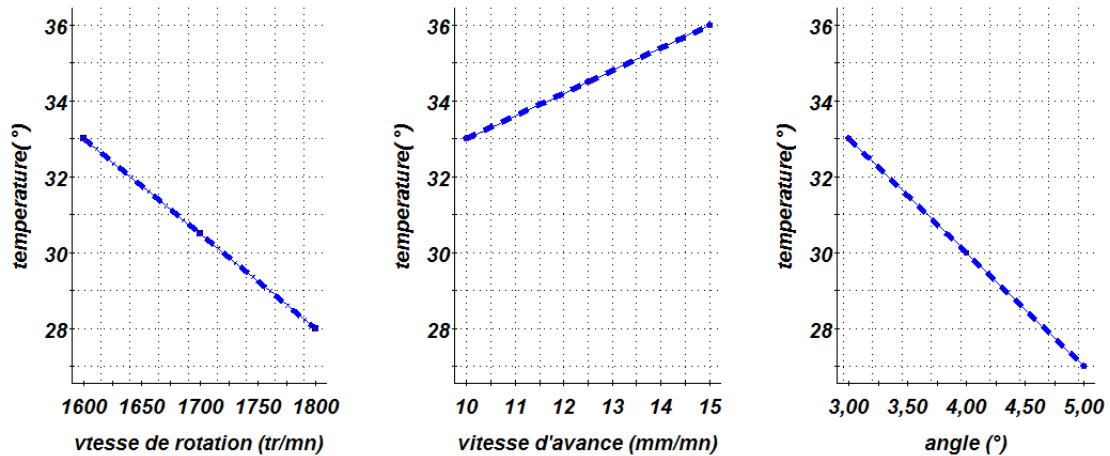


Figure IV.4: Les graphiques suivants montrent la relation entre la température et trois variables

Les figures suivantes montrent l'influence des trois paramètres principaux respectivement vitesse de rotation, vitesse d'avance et l'angle de l'outil sur la température au cours du phénomène de soudage. Dans ces figures on a trois remarques.

Effet de la vitesse de rotation sur la température : La courbe montre une relation linéaire négative entre la vitesse de rotation et la température. À mesure que la vitesse de rotation augmente de 1600 tr/min à 1800 tr/min, la température diminue d'environ 34°C à 28°C. Cela signifie que des vitesses de rotation plus élevées entraînent des températures plus basses.

L'effet de la vitesse d'avance sur la température : La courbe montre une relation linéaire positive entre la vitesse d'avance et la température. À mesure que la vitesse d'avance augmente de 10 mm/mn à 15 mm/mn, la température augmente d'environ 28°C à 36°C. Cela indique que des vitesses d'avance plus élevées entraînent des températures plus élevées.

L'effet d'Angle sur la température : La courbe montre une relation linéaire négative entre l'angle et la température. À mesure que l'angle augmente de 3,0° à 5,0°, la température diminue d'environ 34°C à 28°C. Cela signifie que des angles plus grands entraînent des températures plus basses.

IV.5.2. Effet des interactions

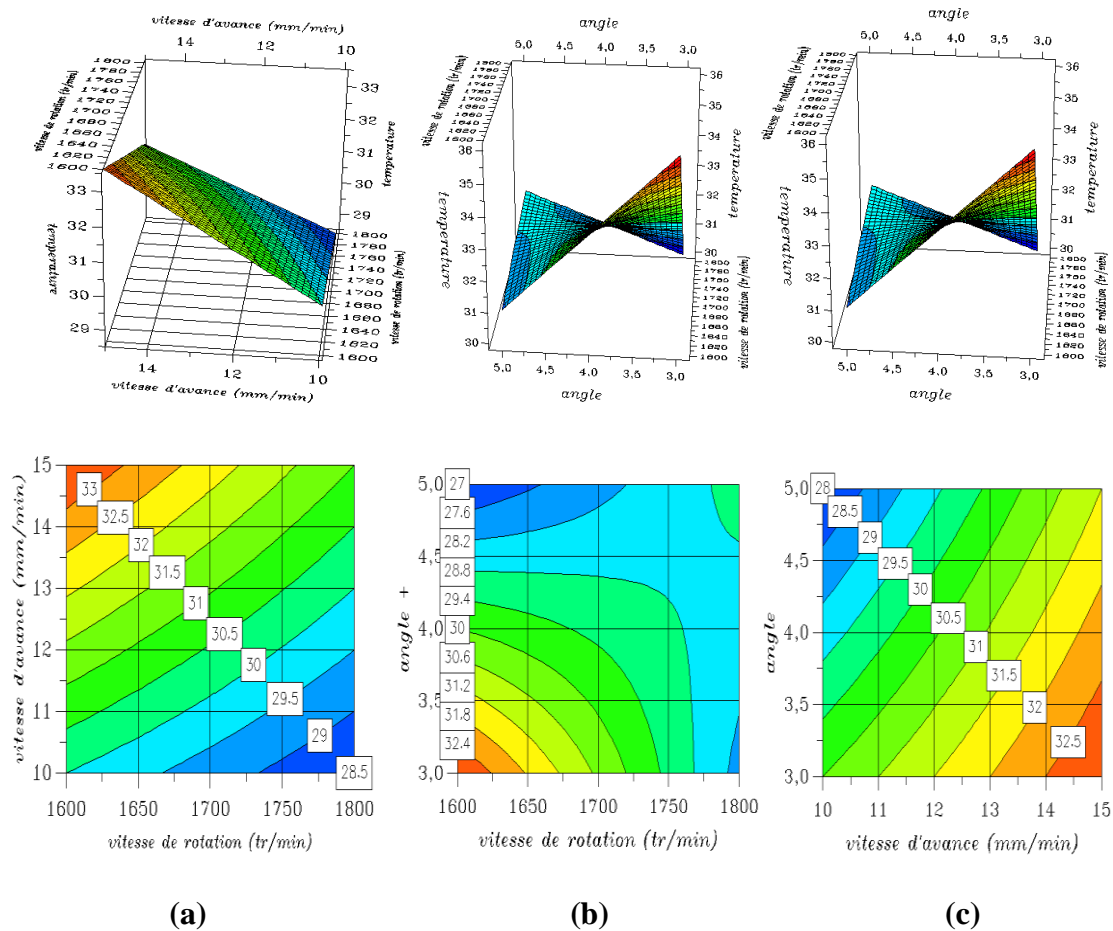


Figure IV.5: effet d'interaction

Les figures IV.5 (a), (b) et (c) ils représentent les interactions I12, I13e t I23, Sur la Figure IV.5 (a), permet de visualiser comment la combinaison de la vitesse de rotation et de la vitesse d'avance influence la température. Les résultats montrent que pour maintenir une température plus basse, il est préférable d'opter pour une vitesse de rotation plus élevée et une vitesse d'avance plus faible. Inversement, pour des températures plus élevées, une vitesse de rotation plus faible et une vitesse d'avance plus élevée sont préférables. Dans l'interaction I13 (b), ce cas explique illustre l'impact combiné de la vitesse de rotation et de l'angle sur la température. Les résultats indiquent qu'une vitesse de rotation élevée et un angle important favorisent le maintien d'une température plus basse. À l'inverse, pour obtenir des températures plus élevées, il est préférable de choisir une vitesse de rotation plus faible et un angle réduit. et dans le dernier cas (c), nous remarquons dans ce cas que si la vitesse d'avance augmente, la température augmente avec elle, à l'opposé de l'angle, qui si elle augmente, la température diminue. Ainsi, on conclut que si l'on veut une température élevée, la vitesse d'avance doit augmenter avec une petite l'angle.

IV.6. Conclusion

Pour obtenir des joints soudés par friction-malaxage de qualité, il est essentiel de fournir un apport de chaleur adéquat. La quantité de chaleur requise dépend de plusieurs facteurs, notamment l'épaisseur du matériau et la métallurgie des matériaux de base, ces derniers étant particulièrement critiques. La modélisation et la simulation sont des outils indispensables pour évaluer les résultats attendus tout en économisant sur les matériaux, le temps et les coûts des essais. Ce travail expérimental a permis de prédire l'apport de chaleur à l'interface critique entre l'outil et le métal de base.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Le soudage du PEHD par FSW est une technique prometteuse qui nécessite une compréhension approfondie des paramètres de processus pour être efficace. La gestion précise de la température par le contrôle des variables telles que la vitesse de rotation, la vitesse d'avance et l'angle de l'outil est essentiel pour garantir des soudures de haute qualité. Cette technique offre une méthode robuste et efficace pour assembler des composants en PEHD, ouvrant de nouvelles possibilités pour son utilisation dans diverses applications industrielles.

Elle s'y prête convenablement puisque il s'agit là des résultats expérimentaux à traité et analyser. Les résultats obtenus sont encourageant, cela nous a poussés à soumettre cela à des séminaires internationaux et prochainement aux journaux scientifique pour publication ; l'utilisation de cette méthode permet de connaître qu'elles sont les paramètres les plus influents, ainsi leur position (niveau) d'influence avec une modélisation précise. Malgré les progrès réalisés à plusieurs niveaux, y compris expérimental (techniques permettant de montrer les caractéristiques élémentaires d'un matériau après le soudage), numérique (codes de calcul capables de réaliser des simulations complexes) et théorique (modèles de comportement performants), il reste cependant beaucoup à faire. Avant d'arriver à une parfaite maîtrise de la prédiction de certains phénomènes "indésirables" liés au soudage par friction malaxage.

Cette étude a quantifié les effets des trois facteurs, tels que la vitesse de rotation, la vitesse d'avance et l'angle, sur la qualité de joint de soudure. Les résultats obtenus sont encourageants, cela est confirmé par le test de fichier (modèle choisi); l'utilisation de la méthode de conception d'expériences montre que tous les facteurs ont un effet significatif et que le facteur vitesse de rotation est le paramètre le plus influent ainsi que l'optimum se trouve si tous les facteurs occupent leurs niveaux hauts. Les défis des entreprises de ce secteur sont nombreux et la compétitivité est une tâche difficile à assurer vue la forte concurrence existant dans ce domaine.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Saidoun, A., *Analyse numérique et expérimentale de l'interaction non-linéaire onde/fissure de fatigue par la méthode de génération d'harmoniques*, 2017, Université De Bordeaux.
- [3]. Elangovan, K. and V. Balasubramanian, *Influences of pin profile and rotational speed Of the tool on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium Alloy*. Materials Science and Engineering: A, 2007. **459**(1-2): p. 7-18.
- [4]. Sakthivel, T., G. Sengar, and J. Mukhopadhyay, *Effect of welding speed on Microstructure and mechanical properties of friction-stir-welded aluminum*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009. **43**: p. 468-473.
- [5]. Guedoiri, A., et al. *An analysis of boundary condition effects on the thermo mechanical Modeling of the FSW process*. In *AIP Conference Proceedings*. 2011. American Institute of Physics.
- [6]. Jemal, N., *Contribution à la caractérisation thermique et mécanique de la zone soudée En FSW*, 2011, Arts et Métiers Paris Tech.
- [7]. He, X., F. Gu, and A. Ball, *A review of numerical analysis of friction stir welding*. Progress in Materials Science, 2014. **65**: p. 1-66.
- [8]. Dialami, N., et al., *Challenges in thermo-mechanical analysis of friction stir welding Processes*. Archives of Computational Methods in Engineering, 2017. **24**: p. 189-225.
- [9]. Serier, M., et al., *Effect of FSW welding parameters on the tensile strength of Aluminum alloys*. Archives of Mechanical Technology and Materials, 2019. **39**: p. 41-45.
- [10]. Serier, M., M. Berrahou, and A. Chikh, *Parametric study of friction stir welding using Elastic return*. Archives of Mechanical Technology and Materials, 2020. **40**.
- [11]. Soori, M., M. Asmael, and D. Solyalı, *Recent development in friction stir welding process*. SAE International Journal of Materials and Manufacturing, 2021. **14**(1): p. 63-80.
- [12]. Singh, U.K., A.K. Dubey, and A. Pandey. *Thermal analysis of friction stir welding for Different tool geometries*. in *Advances in Manufacturing and Industrial Engineering: Select Proceedings of ICAPIE 2019*. 2021. Springer.
- [13]. Kumar, R., V. Upadhyay, and C. Sharma, *Effect of welding parameters in friction stir welding of dissimilar alloys AA2014 and AA7075*. Materials Today: Proceedings, 2021. **47**: p. 6551-6555.
- [14]. Khalaf, H.I., et al., *Effects of underwater friction stir welding heat generation on residual stress of AA6068-T6 aluminum alloy*. Materials, 2022. **15**(6): p. 2223.
- [15]. Leon, S.L.J., et al., *Analytical and numerical thermal analysis on friction stir welding using polygonal tool pin*. IIUM Engineering Journal, 2021. **22**(2): p. 352-363.
- [16]. Al-Sabur, R., *Tensile strength prediction of aluminium alloys welded by FSW using response surface methodology–Comparative review*. Materials Today: Proceedings, 2021. **45**: p. 4504-4510.
- [17]. Sun, Z., P. Liu, and X. Yu, *Thermomechanical analysis of friction stir welding using a new velocity-based model for tool-workpiece interaction*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022. **121**(11-12): p. 7341-7357.
- [18]. Khalaf, H.I., et al., *The Effects of Pin Profile on HDPE Thermomechanical Phenomena during FSW*. Polymers, 2022. **14**(21): p. 4632.

BIBLIOGRAPHIE

- [19]. Asmare, A., R. Al-Sabur, and E. Messele, *Experimental investigation of friction stir welding on 6061-t6 aluminum alloy using taguchi-based gra.* Metals, 2020. **10**(11): p.1480.
- [20]. Boukraa, M., et al., *Thermal analysis of the friction stir welding process based on boundary conditions and operating parameters.* Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, 2021. **70**(4).
- [21]. Serier, M., et al., *Parametric studies of friction stir welding with tool using a vibrating shoulder.* Materials Today: Proceedings, 2022. **62**: p. 70-76.
- [22]. Veljić, D.M., et al., *Thermo-mechanical analysis of linear welding stage in friction stir welding Influence of Welding Parameters.* Thermal Science, 2022. **26**(3A): p.2125-2134.
- [23]. Melaku, L.E., et al., *Optimization and thermal analysis of friction stir welding on AA6061 aluminum alloys.* Materials Today: Proceedings, 2022. **65**: p. 3348-3356.
- [24]. Chalurkar, C. and D.K. Shukla. *Temperature Analysis of Friction Stir Welding (AA6061-T6) with Coupled Eulerian-Lagrangian Approach.* in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2022. IOP Publishing.
- [25]. Mishin, V., et al., *Numerical simulation of the thermo-mechanical behavior of 6061aluminum alloy during friction-stir welding.* Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2022. **6**(4): p. 68.
- [26]. Salih, O.S., H. Ou, and W. Sun, *Heat generation, plastic deformation and residual stresses in friction stir welding of aluminium alloy.* International Journal of Mechanical Sciences, 2023. **238**: p. 107827.
- [27]. Sharma, Y., et al., *Analysis of friction stir welds using numerical modelling approach: a comprehensive review.* International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM), 2023: p. 1-14.
- [28]. Singh, R. and Y. Kumar, *Effect of cooling tank embedded fixture design on the Thermal analysis of friction stir welded aluminum alloy.* Journal of Materials Engineering and Performance, 2023. **32**(16): p. 7215-7224.
- [29]. Thomas, W., et al., *Friction stir butt welding, international patent application no. PCT/GB92 Patent application, 1991(9125978.8).*
- [30]. Mishra, R.S. and Z. Ma, *Friction stir welding and processing.* Materials science and engineering: R: reports, 2005. **50**(1-2): p. 1-78.
- [31]. Zimmer, S., *Contribution a l'industrialisation du soudage par friction malaxage,* 2009, Paris, ENSAM.
- [32]. Cao, X. and M. Jahazi, *Effect of tool rotational speed and probe length on lap joint quality of a friction stir welded magnesium alloy.* Materials & Design, 2011. **32**(1): p.1-11.
- [33]. Singh, K., G. Singh, and H. Singh, *Investigation on the microstructure and Mechanical properties of a dissimilar friction stir welded joint of magnesium alloys.* Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2019. **233**(12): p. 2444-2454.
- [34]. Guerin, B.J.P., *Soudage d'alliages d'aluminium par la technologie Friction Stir Welding Bobbin Tool,* 2010, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne.
- [35]. Kitamura, K., et al., *Flexible control of the microstructure and mechanical properties of friction stir welded Ti-6Al-4V joints.* Materials & Design (1980-2015), 2013. **46**: p.348-354.
- [36]. Buffa, G., L. Fratini, and F. Micari, *Mechanical and microstructural properties*

BIBLIOGRAPHIE

- prediction by artificial neural networks in FSW processes of dual phase titanium alloys.* Journal of Manufacturing Processes, 2012. **14**(3): p. 289-296.
- [37]. Sharifitabar, M. and H. Nami, *Microstructures of dissimilar friction stir welded joints between 2024-T4 aluminum alloy and Al/Mg₂Si metal matrix cast composite.* Composites Part B: Engineering, 2011. **42**(7): p. 2004-2012.
- [38]. Bozkurt, Y., H. Uzun, and S. Salman, *Microstructure and mechanical properties of friction stir welded particulate reinforced AA2124/SiC/25p-T4 composite.* Journal of Composite Materials, 2011. **45**(21): p. 2237-2245.
- [39]. Threadgill, P., et al., *Friction stir welding of aluminium alloys.* International Materials Reviews, 2009. **54**(2): p. 49-93.
- [40]. Shercliff, H.R., et al., *Microstructural modelling in friction stir welding of 2000 series aluminium alloys.* Mechanics & Industry, 2005. **6**(1): p. 25-35.
- [41]. Reynolds, A.P., W. Lockwood, and T. Seidel. *Processing-property correlation in friction stir welds.* in *Materials science forum.* 2000. Trans Tech Publ.
- [42]. Guedoiri, A., *Contribution à la modélisation et à la simulation numérique du soudage par friction et malaxage,* 2012, Paris, ENSAM.
- [43]. Unités, S.D., *ÉTUDE NUMÉRIQUE ET EXPERIMENTALE DES MECANISMES THERMIQUES LORS DU SOUDAGE PAR FRICTION MALAXAGE.*
- [44]. Han, Y., et al., *Microstructure and mechanical properties of electrically assisted friction stir welded AZ31B alloy joints.* Journal of Manufacturing Processes, 2019. **43**: p. 26-34. []
- [45]. Liu, X., S. Lan, and J. Ni, *Electrically assisted friction stir welding for joining Al 6061 to TRIP 780 steel.* Journal of materials processing technology, 2015. **219**: p. 112-123.
- [46]. Chen, S., et al., *Mechanical properties of electric assisted friction stir welded 2219 aluminum alloy.* Journal of Manufacturing Processes, 2019. **44**: p. 197-206.
- [47]. Sajed, M., J.W.G. Guerrero, and H.A. Derazkola, *A Literature Survey on Electrical-Current-Assisted Friction Stir Welding.* Applied Sciences, 2023. **13**(3): p. 1563.
- [48]. Ferrando, W.A., *The concept of electrically assisted friction stir welding (EAFSW) and application to the processing of various metals.* Naval Surface Warfare Center, 2008.
- [49]. Chen, S., et al., *Microstructure and mechanical properties of AZ31B Mg alloy fabricated by friction stir welding with pulse current.* Journal of Manufacturing Processes, 2021. **71**: p. 317-328.
- [50]. Mandache, C., et al., *Pulsed eddy current testing of friction stir welds.* Materials Evaluation, 2008. **66**(4).
- [51]. Balasubramanian, V., V. Ravisankar, and G. Madhusudhan Reddy, *Effect of pulsed current welding on mechanical properties of high strength aluminum alloy.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008. **36**: p. 254-262.
- [52]. Wang, L., et al., *Microstructure and Mechanical Properties of Dissimilar Mg Alloy with Cu Interlayer Fabricated by Pulse Current Assisted Friction Stir Welding.* Journal of Materials Engineering and Performance, 2023. **32**(6): p. 2661-2675.
- [53]. Potluri, N., et al., *Studies on weld metal characteristics and their influence on tensile and fatigue properties of pulsed-current GMA welded Al-Zn-Mg alloy.* Welding journal, 1996. **75**(2).
- [54]. SHINODA, T. and Y. UENO, *Effect of pulsed welding current on solidification*

BIBLIOGRAPHIE

- cracking in austenitic stainless steel welds*. Transactions of the Japan Welding Society, 1990. **21**(1): p. 18-23.
- [55]. Li, G., et al., *Effect of self-reacting friction stir welding on microstructure and mechanical properties of Mg-Al-Zn alloy joints*. Journal of Manufacturing Processes, 2019. **37**: p. 1-10.
- [56]. Liu, H., J. Hou, and H. Guo, *Effect of welding speed on microstructure and mechanical properties of self-reacting friction stir welded 6061-T6 aluminum alloy*. Materials & Design, 2013. **50**: p. 872-878.
- [57]. Zhou, L., et al., *Microstructural characteristics and mechanical properties of Al-Mg-Si alloy self-reacting friction stir welded joints*. Science and Technology of Welding and Joining, 2017. **22**(5): p. 438-445.
- [58]. Li, G., et al., *Microstructure and mechanical properties of self-reacting friction stir welded AA2219-T87 aluminium alloy*. Science and Technology of Welding and Joining, 2020. **25**(2): p. 142-149.
- [59]. Zhou, L., et al., *Effect of rotation speed on microstructure and mechanical properties of self-reacting friction stir welded Al-Mg-Si alloy*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017. **89**: p. 3509-3516.
- [60]. Al-Sabur, R.K. and A.K. Jassim. *Friction stir spot welding applied to weld dissimilar metals of AA1100 Al-alloy and C11000 copper*. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. IOP Publishing.
- [61]. Sanusi, K. and E.T. Akinlabi. *Material characterization of dissimilar friction stir spot welded Aluminium and Copper alloy*. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. IOP Publishing.
- [62]. Shen, Z., Y. Ding, and A.P. Gerlich, *Advances in friction stir spot welding*. Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, 2020. **45**(6): p. 457-534.
- [63]. Pan, T.-Y., *Friction stir spot welding (FSSW)-a literature review*. 2007.
- [64]. Yang, X., T. Fu, and W. Li, *Friction stir spot welding: a review on joint macro- and microstructure, property, and process modelling*. Advances in Materials Science and Engineering, 2014. **2014**.
- [65]. Fujimoto, M., et al., *Microstructural analysis of stir zone of Al alloy produced by friction stir spot welding*. Science and Technology of Welding and Joining, 2008. **13**(7): p. 663-670.
- [66]. Zimmer, S., et al. *FSW: Un procédé de soudage pour les alliages d'aluminium de fonderie*. in *11ème Colloque National AIP PRIMECA, La Plagne*. 2009.
- [67]. Tongne, A., *Étude expérimentale et numérique du procédé de soudage FSW (Friction Stir Welding). Analyse microstructurale et modélisation thermomécanique des conditions de contact outil/matière transitoires*, 2014, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne.
- [68]. Dardouri, F., *Dispositif d'assistance associé à des robots manipulateurs utilisés dans des procédés de fabrication/FSW*, 2018, Paris, ENSAM.
- [69]. Muthukumar, S. and S. Mukherjee, *Multi-layered metal flow and formation of onion rings in friction stir welds*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008. **38**: p. 68-73.
- [70]. Moustafa, B., et al. *Simulation numérique du transfert de chaleur pendant le procédé de soudage par friction malaxage durant deux phases*. in *Conférence Internationale sur le Soudage, le CND et l'Industrie des Métaux, IC-WNDT-MI'14*. 2014. Centre de Recherche Scientifique et Technique en Soudage et Contrôle (CSC).

BIBLIOGRAPHIE

- [71]. HELAL, Y., *L'effet de soudage par friction sur la microstructure et les propriétés mécaniques d'un joint soudé composé d'un alliage d'aluminium industriel et un acier*, 2017, UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA.
- [72]. Aval, H.J., *Influences of pin profile on the mechanical and microstructural behaviors in dissimilar friction stir welded AA6082-AA7075 butt joint*. *Materials & Design*, 2015. **67**: p. 413-421.
- [73]. Maneiah, D., et al., *Process parameters optimization of friction stir welding for Optimum tensile strength in Al 6061-T6 alloy butt welded joints*. *Materials Today: Proceedings*, 2020. **27**: p. 904-908.
- [74]. Dawes, C., *Friction Stir Joining of Aluminium Alloy*. *Welding Journal*, 1995. **36**.
- [75]. Kassab, R.K., *Modélisation par la méthode des éléments finis des distorsions dues au soudage d'un joint en T*, 2007, École de technologie supérieure.
- [76]. Hellier, A., et al., *Effect of ultrasonic peening on fatigue crack propagation from a Weld toe*. 2016.
- [77]. Carvill, J., *Mechanical engineer's data handbook*1994: Butterworth-Heinemann.
- [78]. BOUKHARI, D., *ANALYSES EXPERIMENTALES ET NUMERIQUES DE L'EFFET D'ANGLE DE SOUDAGE FSW DES MATERIAUX POLYMERES CAS DU PEHD*, Université de Mascara-Mustapha Stambouli.
- [79]. Zimmer, S., et al., *Experimental investigation of the influence of the FSW plunge Processing parameters on the maximum generated force and torque*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010. **47**: p. 201-215.
- [80]. Nyang'au, M.G., A.M. Muumbo, and F.N. Mutua, *A review of the application of Friction stir welding on hard-to-weld materials*. *African Journal of Engineering Research*, 2024. **12**(1): p. 1-11.
- [81]. Zhou, Z., et al., *Corrosion and protection of friction stir welding of magnesium alloy*. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 2024. **71**(1): p. 47-54.
- [82]. Jiang, Y., et al., *Vacuum laser beam welding of AZ31 magnesium alloy: Weld Formability, microstructure and mechanical properties*. *Optics & Laser Technology*, 2024. **169**: p. 110115.
- [83]. Vyskoč, M., et al., *Microstructure-Properties relationship in laser-welded AZ31B magnesium alloy*. *Materials Characterization*, 2024: p. 113664.
- [84]. Jha, R.K., K.V. Reddy, and S. Pal, *A molecular dynamic simulation-based study on nanoscale friction stir welding between copper and aluminium*. *Molecular Simulation*, 2024. **50**(2): p. 117-128.
- [85]. Liu, F., et al., *Studies on thermal stability, softening behavior and mechanism of an ADS copper alloy at elevated temperatures*. *Journal of Materials Science & Technology*, 2024. **186**: p. 79-90.
- [86]. Li, J., et al., *Microstructure performance and Nano-Effect of laser alloying composites with Multi-Phase on TA1 titanium alloy*. *Optics & Laser Technology*, 2024. **169**: p.109975.
- [87]. Deconinck, L., T. Depover, and K. Verbeken, *Characterisation of hydride formation in as-built and heat treated laser powder bed fused Ti-6Al-4V*. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024. **972**: p. 172859.
- [88]. Ragab, M., et al., *Numerical and experimental study of underwater friction stir Welding of 1Cr11Ni2W2MoV heat-resistant stainless steel*. *Journal of Materials*

BIBLIOGRAPHIE

- Research and Technology, 2024.
- [89]. Khan, F., et al., *Sound dissimilar linear friction welding of A7075-T6 Al and mild steel by simultaneous interfacial deformation using higher forging speed*. Journal of Manufacturing Processes, 2024. **109**: p. 512-523.
- [90]. Işitan, A., S. Aytekin, and V. Onar, *Enhancing the Microstructure and Mechanical Properties of Cast Aluminum Matrix Composites through Nano-Al₂O₃ Reinforcement via CMT and PMC Welding*. International Journal of Metalcasting, 2024: p. 1-14.
- [91]. Geng, P., et al., *Effect of tool revolutionary pitch on heat transfer and material flow in Al/steel friction stir lap welding*. Journal of materials processing technology, 2024: p.118306.
- [92]. Chen, Z., et al., *Numerical and experimental investigation on intermetallic compounds formation in ultrasonic vibration enhanced friction stir welding of dissimilar Al/Mg alloys*. Journal of Alloys and Compounds, 2024: p. 173426.
- [93]. Qu L, M.N., Xiao X, Zhang K, Li H., *Microstructure and Properties of Nonlinear Lap Joint of 6061 Aluminum Alloy by Friction Stir Welding*. Metals. 2023. **13(8):1494**.
- [94]. Patel, M.M. and V.J. Badheka, *A review on friction stir welding (FSW) process for dissimilar aluminium to steel metal systems*. Welding International, 2024. **38(2)**: p. 91-115.
- [95]. Aval, H.J. and I. Galvão, *Characterization of friction stir welded Al-4Cu-Mg alloy/Al-16Si-4Cu-10SiC composite joint*. Journal of Advanced Joining Processes, 2024: p.100192.
- [96]. Ambrosio, D., et al., *Extremely thin intermetallic layer in dissimilar AA6061-T6 and Mild steel friction stir lap welding using a hemispherical tool*. Scientific Reports, 2024. **14(1)**: p. 1718.
- [97]. Gemme, F., *Modélisation numérique des phénomènes physiques du soudage par friction-malaxage et comportement en fatigue de joints soudés en aluminium 7075-T6*, 2011, École Polytechnique de Montréal.
- [98]. Demouche, M., *Etude de l'influence des paramètres de soudage par friction sur la qualité des joints soudés*, 2020.
- [99]. Proton, V., *Caractérisation et compréhension du comportement en corrosion de Structures en alliage d'aluminium-cuivre-lithium 2050 assemblées par Friction Stir Welding (FSW)*, 2012.
- [100]. Schneider, J. and A. Nunes Jr. *Thermo-mechanical processing in friction stir welds*. In *TMS (The Mineral, Metals, and Materials Society) 2003, 132nd Annual Meeting and Exhibition*. 2002.
- [101]. Le Jolu, T., *Étude de l'influence des défauts de soudage sur le comportement plastique et la durée de vie en fatigue de soudures par friction-malaxage d'un alliage Al-Cu-Li*, 2011, École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- [102]. Tchein, G.J., *Étude des couplages thermomécaniques et microstructuraux d'un alliage de titane au cours du soudage FSW*, 2018, Bordeaux.
- [103]. Lorrain, O., *Analyses expérimentales et numériques du procédé de soudage par Friction malaxage fsw*, 2010, Arts et Métiers ParisTech.
- [104]. Liu, H., L. Zhou, and Q. Liu, *Microstructural characteristics and mechanical Properties of friction stir welded joints of Ti-6Al-4V titanium alloy*. Materials & Design, 2010. **31(3)**: p. 1650-1655.
- [105]. Cavaliere, P., A. Squillace, and F. Panella, *Effect of welding parameters on*

BIBLIOGRAPHIE

- Mechanical and microstructural properties of AA6082 joints produced by friction stir Welding*. Journal of materials processing technology, 2008. **200**(1-3): p. 364-372.
- [106]. Yan, J., M.A. Sutton, and A.P. Reynolds, *Process–structure–property relationships for nugget and heat affected zone regions of AA2524–T351 friction stir welds*. Science and Technology of Welding and Joining, 2005. **10**(6): p. 725-736.
- [107]. Cavaliere, P., et al., *Effect of welding parameters on mechanical and microstructural properties of AA6056 joints produced by friction stir welding*. Journal of materials processing technology, 2006. **180**(1-3): p. 263-270.
- [108]. Reynolds, A.P., et al., *Relationships between weld parameters, hardness distribution and temperature history in alloy 7050 friction stir welds*. Science and Technology of Welding and Joining, 2005. **10**(2): p. 190-199.
- [109]. Vivekanandan, P., et al., *The experimental analysis of friction stir welding on Aluminium composites*. International Journal of Metallurgical Engineering, 2012. **1**(4):p. 60-65.
- [110]. Kim, Y., et al., *Three defect types in friction stir welding of aluminum die casting Alloy*. Materials Science and Engineering: A, 2006. **415**(1-2): p. 250-254.
- [111]. De Backer, J., *Feedback control of robotic friction stir welding*, 2014, University West.
- [112]. Nunes, A., *Heat input and temperature distribution in friction stir welding*. Journal of materials processing & manufacturing science, 1998. **7**: p. 163.
- [113]. Chibane, H., *Contribution à l'optimisation multi-objectif des paramètres de coupe en usinage et apport de l'analyse vibratoire: application aux matériaux métalliques et composites*, 2013, Tours.
- [114]. Idris, D.Y.; Available from:
<https://elearning.univbejaia.dz/mod/resource/view.php?id=46601&forceview=1>.
- [115]. Triboulet, P., *Notions de bases sur les plans d'expériences*. Chalon sur Saône, 2008.
- [116]. Goupy, J., *Plans d'expériences*2006: Ed. Techniques Ingénieur.
- [117]. Wahdame, B., *Analyse et optimisation du fonctionnement de piles à combustible par la méthode des plans d'expériences*, 2006, Université de Franche-Comté; Université de Technologie de Belfort-Montbeliard.
- [118]. DAAS, M.S., *Plans d'expériences*.
- [119]. Goupy, J. and L. Creighton, *Introduction aux plans experiences–3e edition. Technique et ingenierie, serie conception*. L'usine nouvelle-Dunod, 2006: p. 179-206.
- [120]. Idris, Y., *Les plans d'expériences initiation à la construction et à l'analyse des plans factoriels complets à deux niveaux et du plan composite centré*. Notes de Cours, Département de Génie des Procédés, Faculté de Technologie, Université A. MIRA Bejaia, 2015.
- [121]. Lehembre, B., *Le soudeur Nathan*. Paris ed 1997.
- [122]. Mezrag, B., *Étude de l'influence des paramètres de soudage sur la microstructure et le comportement mécanique des assemblages acier-aluminium obtenu par soudage à l'arc MIG-CMT*, 2015, Université Montpellier; Université Abou Bekr Belkaid (Tlemcen, Algérie).

BIBLIOGRAPHIE

- [123]. Verduzco Juárez, J., et al., *Effect of modified pin profile and process parameters on the friction stir welding of aluminum alloy 6061-T6*. Advances in Materials Science and Engineering, 2016. **2016**.
- [124]. Hamilton, C., S. Dymek, and A. Sommers, *A thermal model of friction stir welding in aluminum alloys*. International journal of machine tools and manufacture, 2008. **48**(10): p. 1120-1130.
- [125]. Louvet, F. and L. Delplanque, *Design of experiments: the French touch*. Orléans: Experimentique, 2005.
- [126] BERKOUS Radja, SOUFI Sofia, Elaboration et Caractérisation d'un Bio-composite à Basa de PEHD Recyclé et de la Fibre de Lin, Master II , Université 8mai 1945 –Guelma, juillet 2019.
- [127]: Reynald DOSSOGNE Ingénieur INSCIR (Institut National Supérieur de Chimie Industrielle de Rouen) Responsable technico-commercial – Solvay S.A, Polyéthylène haute densité PE-HD.
- [128] KADRI Nabila, CHOUABIA Meryem, Elaboration et caractérisation d'une matrice de PEHD/SiO₂, Master, Université 8mai 1945,2020.